

# UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Informatique et des Technologies de l'Information



Mémoire

Master en Informatique

**Domaine :** Mathématique et Informatique

**Filière :** Informatique

**Spécialité :** Administration et Supervision de Réseau

**Présenté par :** MALKI Hocine

**Étude comparative entre deux protocoles de routage géographiques sans balises BOSS et Geraf dans les réseaux WSNs**

**Soutenu publiquement le : 02/07/2019**

Devant le jury composé de :

Président	Mr Kahlessenane Fares	Enseignant	UKM Ouargla
Encadreur	Mr Djediai Ahmida	Enseignant	UKM Ouargla
Examineur	Mme Belkebir Djalila	Enseignant	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2018/2019

## *Avant-propos*

*« Hier, on cantonnait les capteurs au simple rôle de détecteur : température, fumée, intrusion... On leur demande maintenant de relever plusieurs informations, de communiquer entre eux, et même d'analyser leurs données ! »*

*Pierre Maslo, le 01/04/2006*

## *Résumé*

Le routage géographique avec balise dans un réseau de capteurs sans fil (RCSF) exige que les nœuds transmettent périodiquement des messages Hello afin de permettre aux voisins de connaître leurs positions. Cependant ce mécanisme de balisage consomme beaucoup d'énergie, alors les protocoles de routage géographique sans balise ont été proposés pour réduire la charge des messages de contrôle Hello.

Dans ce mémoire, nous avons essayé d'implémenter le protocole BOSS (Beacon-less On Demand Strategy), qu'est le plus célèbre dans la famille des protocoles de routage géographique sans balise. Ce protocole utilise une nouvelle fonction de délai pour réduire les collisions pendant la phase de sélection du prochain relais.

La simulation se fait par l'utilisation du simulateur Castalia sous OMNET++ pour analyser les performances du protocole en termes de bande passante, Delay, PDR et d'efficacité énergétique. Ainsi, de faire une comparaison avec le protocole Geraf pour les trois types de mobilité de sink et les résultats remarquables obtenus.

**Mots Clés :** RCSF, protocole de routage géographique, Beacon-less, BOSS, Geraf, analyse des performances, Delay, PDR, Castalia, OMNET++.

## *Abstract*

The geographic routing with beacon in a wireless sensor network (WSN) nodes requires that periodically transmit Hello messages to allow neighbors to know their position. However this beacon mechanism consumes a lot of energy, so the geographical routing protocols without beacon have been proposed to reduce the burden of Hello control messages.

In this memoir, we tried to implement the protocol BOSS, which is the most famous in the family of geographic routing protocols beacon-less.

This protocol uses a new delay function to reduce collisions during the selection phase of the next relay.

The simulation is done using the Castalia simulator under OMNET++ to analyze the performance of the protocol in terms of bandwidth, Delay, PDR and energy efficiency. Thus, to make a comparison with the Geraf protocol for the three types of sink mobility and the remarkable results obtained.

**Keywords:** WSN, geographic routing protocol, Beacon-less, BOSS, Geraf, Delay, PDR, Castalia, performance analysis, OMNET++

## ملخص

يتطلب التوجيه الجغرافي باستخدام رسائل "Hello" في شبكة الاستشعار اللاسلكية (WSN) أن ترسل رسائل "Hello" بشكل دوري للسماح للمستشعرات المجاورة بمعرفة موقعها. ومع ذلك تستهلك هذه الآلية الكثير من الطاقة، لذلك تم اقتراح بروتوكولات التوجيه الجغرافي بدون رسائل "Hello" لتخفيف استهلاك الطاقة.

في هذه المذكرة، حاولنا تنفيذ بروتوكول BOSS، وهو الأكثر شهرة في عائلة بروتوكولات التوجيه الجغرافي بدون رسائل "Hello" يستخدم هذا البروتوكول دالة جديدة لحساب وقت الانتظار التي تساعد على لتقليل من الاصطدامات خلال مرحلة اختيار المستشعر التالي.

تتم محاكاة تحليل الأداء باستخدام محاكي Castalia ضمن OMNET++ لتحليل أداء البروتوكول من حيث النطاق الترددي والتأخير وPDR وكفاءة الطاقة. وبالتالي، لإجراء مقارنة مع بروتوكول Geraf حسب نوع حركة sink ومقارنة النتائج المحصل عليها.

**كلمات البحث:** بروتوكولات التوجيه الجغرافي، BOSS، sink، شبكة الاستشعار اللاسلكية، WSN، المستشعرات، OMNET++، تحليل الأداء، PDR، Castalia، Geraf.

## ***Remerciements***

*Mes remerciements sincères à mon encadreur : DJEDIAI Ahmida ; Pour sa bonne volonté d'accepter de m'encadrer, pour tout le temps qu'il m'a octroyé et pour tous les conseils qu'il m'a prodigués.*

*Un grand merci à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.*

*Je remercie chaleureusement mes collègues du département informatique, pour leur soutien moral.*

*Enfin, merci à tous mes amis qui m'ont poussé à dépasser tous les problèmes et aller jusqu'au bout et terminé ce projet.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents*

*A ma petite famille*

*MALIKI Hocine*

## Table des matières :

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

### **PARTIE I : Etat de l'art**

#### **Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil**

1.1 Introduction.....	03
1.2 Classification des réseaux sans fil.....	03
1.2.1 Classification selon la zone de couverture.....	04
1.2.2 Classification Selon l'infrastructure.....	05
1.3 Les réseaux mobiles Ad hoc.....	06
1.3.1 Définition d'un réseau ad hoc.....	06
1.3.2 Type des réseaux ad hoc.....	06
1.3.3 Les caractéristiques des réseaux ad hoc.....	07
1.4 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).....	08
1.4.1 Définition d'un capteur sans fil.....	08
1.4.2 Composants d'un capteur sans fil.....	08
1.4.3 Définition d'un RCSF ou WSN (Wireless Sensor Network) .....	10
1.4.4 Domaines d'application des RCSF.....	10
1.4.5 Modèle de communication dans les RCSF.....	12
1.5 Conclusion.....	13

#### **Chapitre 2 : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

2.1 Introduction .....	14
2.2 Contraintes de conception de protocoles de routage pour RCSF.....	14
2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF .....	14
2.3.1 Classification selon la stratégie de routage du protocole.....	16
2.3.2 Classification selon processus de découverte des routes.....	17
2.3.3 Classification selon la structure du réseau.....	18
2.4 Protocole de routage géographique.....	19
2.5 Stratégies de routage géographique.....	20
2.5.1 Routage géographique en mode glouton (Greedy Forwarding).....	20
2.5.2 Routage géographique en mode périmètre (Perimeter Forwarding).....	21
2.5.3 Routage géographique en mode glouton et périmètre .....	22
2.6 Catégorie de routage géographique.....	22
2.6.1 Protocole de routage géographique avec balise.....	22

2.6.2 Protocole de routage géographique sans balise.....	23
2.7 Conclusion.....	23

## **PARTIE II : Contribution**

### **Chapitre 3 : Présentation du protocole BOSS**

3.1 Introduction.....	24
3.2 Définition de la zone de progression .....	24
3.3 Délai de transmission dynamique discret (DDFD).....	25
3.4 Procédures de routage du protocole BOSS.....	26
3.4.1 Phase de diffusion de message DATA.....	27
3.4.2 Phase de d'attente d'une réponse.....	27
3.4.3 Phase de sélection du prochain saut .....	27
3.5 Conclusion.....	28

### **Chapitre 4 : Implémentation et analyse des performances du BOSS**

4.1 Introduction.....	29
4.2 Le Simulateur OMNeT++.....	29
4.3 Castalia.....	29
4.3.1 La structure d'un nœud.....	30
4.4 Implémentation de BOSS.....	31
4.4.1 Aspects algorithmiques .....	33
4.4.2 Environnement de la simulation.....	34
4.4.3 Métriques de la simulation.....	36
4.5 Etude de performances du BOSS selon la mobilité du sink.....	36
4.5.1 Les paquets délivrés.....	37
4.5.2 Les paquets dupliqués.....	38
4.5.3 Consommation d'énergie.....	39
4.5.4 Délai moyen de bout en bout.....	40
4.6 Conclusion.....	41

### **Chapitre 5 : Comparaison BOSS avec Geraf**

5.1 Introduction.....	42
5.2 Cas sink fixe.....	42
5.2.1 Les paquets dupliqués.....	42
5.2.2 Consommation d'énergie.....	44
5.2.3 Les paquets délivrés .....	45
5.2.4 Délai moyen de bout en bout .....	46



5.3 Cas sink en mouvement aléatoire.....	47
5.3.1 Les paquets dupliqués.....	47
5.3.2 Consommation d'énergie.....	48
5.3.3 Les paquets délivrés .....	49
5.3.4 Délai moyen de bout en bout .....	50
5.4 Cas sink en mouvement régulier.....	51
5.4.1 Les paquets dupliqués.....	51
5.4.2 Consommation d'énergie.....	52
5.4.3 Les paquets délivrés .....	53
5.4.4 Délai moyen de bout en bout .....	54
5.5 Conclusion.....	55
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>58</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 – Classification des réseaux sans fil [30].....	03
Figure 1.2 – Classification des réseaux sans fil suivant leur taille [31].....	04
Figure 1.3 – Réseaux cellulaires [30].....	05
Figure 1.4 – Un capteur sans fil [37].....	08
Figure 1.5 – Architecture d’un capteur sans fil.....	09
Figure 1.6 – Architecture d’un réseau de capteur sans fil.....	10
Figure 1.7 – Domaines d’applications [41].....	11
Figure 1.8 – Modèle en couche pour la communication dans les RCSF [40].....	12
Figure 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les RCSF [9].....	15
Figure 2.2 – Exemple de Greedy Forwarding [28].....	20
Figure 2.3 – La distance entre 2 points .....	20
Figure 2.4 – Présence d’un trou [28].....	21
Figure 2.5 – Mode périmètre [28].....	21
Figure 2.6 – Mode glouton et périmètre.....	22
Figure 3.1 – La zone de progression.....	24
Figure 3.2 – Division en zone pour la DDFD [3].....	26
Figure 3.3 – Mécanisme de 3-way handshake du BOSS.....	26
Figure 4.1 – Les connexions des modules sous Castalia [2].....	30
Figure 4.2 – Les principaux composants d’un nœud [2].....	30
Figure 4.3 – Protocole BOSS -Emission protocole .....	31
Figure 4.4 – Protocole BOSS -Réception.....	32
Figure 4.5 – Déploiement aléatoire des nœuds.....	35
Figure 4.6 – Paquet délivré-Durée de simulation.....	37
Figure 4.7 – Paquet délivré-Vitesse de mobilité .....	37
Figure 4.8 – Paquet délivré-Nombre de régions.....	37
Figure 4.9 – Paquet délivré-Longueur de champ.....	37
Figure 4.10 – Paquet dupliqué-Durée de simulation.....	38
Figure 4.11 – Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité.....	38
Figure 4.12 – Paquet dupliqué-Nombre de régions.....	38
Figure 4.13 – Paquet dupliqué-Longueur de champ.....	38
Figure 4.14 – Energie-Durée de simulation.....	39
Figure 4.15 – Energie-Vitesse de mobilité.....	39
Figure 4.16 – Energie-Nombre de régions.....	39
Figure 4.17 – Energie-Longueur de champ.....	39
Figure 4.18 – Délai moyen-Durée de simulation.....	40
Figure 4.19 – Délai moyen -Vitesse de.....	40
Figure 4.20 – Délai moyen-Nombre de régions.....	40
Figure 4.21 – Délai moyen-Longueur de champ.....	40
Figure 5.1 – Energie-durée de simulation-Fixed_Sink.....	42
Figure 5.2 – Paquet délivré-durée de simulation-Fixed_Sink.....	42
Figure 5.3 – Paquet Dupliqué-durée de simulation-Fixed_Sink.....	42
Figure 5.4 – Délai-durée de simulation-Fixed_Sink.....	42
Figure 5.5 – Energie-durée de simulation-Moving_Sink_Random.....	44

Figure 5.6 – Paquet délivré-durée de simulation-Moving_Sink_Random.....	44
Figure 5.7 – Paquet Dupliqué-durée de simulation-Moving_Sink_Random.....	44
Figure 5.8 – Délai-durée de simulation-Moving_Sink_Random.....	44
Figure 5.9 – Energie-durée de simulation-Moving_Sink_Regular.....	45
Figure 5.10 – Paquet délivré-durée de simulation-Moving_Sink_Regular.....	45
Figure 5.11 – Paquet Dupliqué-durée de simulation-Moving_Sink_Regular.....	45
Figure 5.12 – Délai-durée de simulation-Moving_Sink_Regular.....	45
Figure 5.13 – Energie-vitesse de mobilité-Fixed_Sink.....	46
Figure 5.14 – Paquet délivré-vitesse de mobilité-Fixed_Sink.....	46
Figure 5.15 – Paquet Dupliqué-vitesse de mobilité-Fixed_Sink.....	46
Figure 5.16 – Délai-vitesse de mobilité-Fixed_Sink.....	46
Figure 5.17 – Energie-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Random.....	47
Figure 5.18 – Paquet délivré-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Random.....	47
Figure 5.19 – Paquet Dupliqué-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Random.....	47
Figure 5.20 – Délai-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Random.....	47
Figure 5.21 – Energie-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Regular.....	48
Figure 5.22 – Paquet délivré-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Regular.....	48
Figure 5.23 – Paquet Dupliqué-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Regular.....	48
Figure 5.24 – Délai-vitesse de mobilité-Moving_Sink_Regular.....	48
Figure 5.25 – Energie-Nombre de régions-Fixed_Sink.....	49
Figure 5.26 – Paquet délivré-Nombre de région-Fixed_Sink.....	49
Figure 5.27 – Paquet Dupliqué-Nombre de région-Fixed_Sink.....	49
Figure 5.28 – Délai-Nombre de région-Fixed_Sink.....	49
Figure 5.29 – Energie-Nombre de régions-Moving_Sink_Random.....	50
Figure 5.30 – Paquet délivré-Nombre de région-Moving_Sink_Random.....	50
Figure 5.31 – Paquet Dupliqué-Nombre de région-Moving_Sink_Random.....	50
Figure 5.32 – Délai-Nombre de région-Moving_Sink_Random.....	50
Figure 5.33 – Energie-Nombre de régions-Moving_Sink_Regular.....	51
Figure 5.34 – Paquet délivré-Nombre de région-Moving_Sink_Regular.....	51
Figure 5.35 – Paquet Dupliqué-Nombre de région-Moving_Sink_Regular.....	51
Figure 5.36 – Délai-Nombre de région-Moving_Sink_Regular.....	51
Figure 5.37 – Energie-Longueur du champ-Fixed_Sink.....	52
Figure 5.38 – Paquet délivré-Longueur du champ-Fixed_Sink.....	52
Figure 5.39 – Paquet Dupliqué-Longueur du champ-Fixed_Sink.....	52
Figure 5.40 – Délai-Longueur du champ-Fixed_Sink.....	52
Figure 5.41 – Energie-Longueur du champ-Moving_Sink_Random.....	53
Figure 5.42 – Paquet délivré-Longueur du champ-Moving_Sink_Random.....	53
Figure 5.43 – Paquet Dupliqué-Longueur du champ-Moving_Sink_Random.....	53
Figure 5.44 – Délai-Longueur du champ-Moving_Sink_Random.....	53
Figure 5.45 – Energie-Longueur du champ-Moving_Sink_Regular.....	54
Figure 5.46 – Paquet délivré-Longueur du champ-Moving_Sink_Regular.....	54
Figure 5.47 – Paquet Dupliqué-Longueur du champ-Moving_Sink_Regular.....	54
Figure 5.48 – Délai-Longueur du champ-Moving_Sink_Regular.....	54

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Caractéristiques de quelques protocoles de routage [9].....	15
Tableau 4.1 – Caractéristique du PC de la simulation.....	34
Tableau 4.2 – les paramètres de la simulation.....	35

## Liste des abréviations

WSN	Wireless Sensor Networks
RCSF	Réseaux de capteurs sans fil
GPS	Global Position System
GSM	Global System for Mobile Communication
GPRS	General Packet Radio Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks)
WWAN	Wireless Wide Area Networks
UM	unité mobile
MANET	Mobile Ad Hoc Network
WMN	Wireless Mesh Networks
WSN	Wireless Sensor Networks
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
ADC	Analog to Digital Converter
DD	Directed Diffusion
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
SAR	Sequential assignment routing
MMSPEED	Multi Path and Multi SPEED
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
OLSR	Ad-hoc On Demand Distance Vector
ZRP	Zone Routinier Protocol
EAR	Energy Aware Routing
MCFA	Minimum Cost Forwarding Algorithm
GOAFR	Greedy other adaptive face routing
GAP	Geographic adaptive fidelity
APS	Ad-hoc positioning system
TEEN	Threshold sensitive energy efficient sensor network protocol
HPAR	Hierarchical Power-Active Routing
HEED	Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach
BLR	beacon-less routing algorithm
GeRaF	Geographic Random Forwarding routing protocol
BOSS	Beacon-less On Demand Strategy
IGF	A State-Free Robust Communication Protocol
ZPP	Zone de progression positive
ZPN	Zone de progression négative

DDFD	the Discrete Dynamic Forwarding Delay
CSA	the Common Sub Area
NSA	the Number of Sub Area
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++

## Introduction générale

Durant ces dernières années, un nouveau réseau est apparu dans notre vie et ne cesse pas d'envahir tous les domaines autour de nous, même dans notre corps, il nous impressionne par les résultats obtenus surtout dans un environnement hostile pour l'humain. Un réseau sans fil sans infrastructure qui utilise de petits appareils autonomes et interconnectés pour collecter de l'information et de la transférer jusqu'à l'utilisateur final ; c'est ce qu'on appelle le réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Un RCSF est constitué d'un nombre important de nœuds capteurs déployés, d'une manière aléatoire ou déterministe, dans une zone d'intérêt pour collecter de l'information sur le phénomène à observer. Un nœud capteur est un appareil de taille très réduite avec des ressources très limitées en matière d'énergie, de bande passante, de capacité de stockage et de portée de communication. Chaque capteur communique avec un ou plusieurs autres capteurs à travers une liaison sans fil de type radiofréquences, infrarouge, optique ou acoustique.

Chaque capteur du RCSF a deux fonctions ; la première consiste à capter l'information par la mesure d'une valeur physique et ajouter des traitements sur cette mesure si nécessaire, la deuxième consiste à participer au routage en transmettant l'information aux autres capteurs jusqu'à arriver au nœud passerelle (dit puits ou sink en anglais) par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le choix du prochain nœud (le relais) qui va transmettre l'information dépend de l'algorithme de routage utilisé. Une fois l'information arrivée au sink sera transmise par internet ou par satellite à l'ordinateur central pour l'analyser et prendre des décisions.

Les capteurs se communiquent entre eux à travers un protocole de routage qui permet de choisir l'acheminement optimal de l'information par le réseau sans fil en prenant les capteurs comme relais jusqu'à arriver au sink et prendre en compte que les ressources du capteur sont limitées surtout l'énergie de la batterie.

Le routage géographique consiste à utiliser la position du nœud pour prendre des décisions de routage, le routage géographique avec balise exige que les nœuds transmettent périodiquement un message Hello, afin de permettre aux voisins à un seul saut de connaître leurs positions. Ce mécanisme de balisage consomme beaucoup d'énergie. Pour cela, le routage géographique sans balise a été proposé, qui consiste à faire la découverte du voisinage uniquement à la demande à travers un mécanisme de sélection du prochain relais. Le protocole BOSS est un protocole de routages géographiques sans balise.

L'objectif de notre travail de fin d'étude consiste à faire :

- L'implémentation du protocole BOSS.
- L'analyse de ses performances selon la mobilité de sink.
- La comparaison du protocole BOSS avec le protocole Geraf à travers les résultats obtenus.

Ce rapport est organisé en deux parties :

- Partie 1 : représente l'état de l'art, qui contient deux chapitres organisés comme suivant :
  - Chapitre 1 : représente un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil
  - Chapitre 2 : représente un état de l'art sur les protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, on va présenter le routage géographique.
- Partie 2 : contient notre contribution, organisée en trois chapitres :
  - Chapitre 3 : présentation détaillée du protocole BOSS.
  - Chapitre 4 : implémentation du protocole BOSS sous Castalia et l'analyse de ses performances pour les trois cas de mobilité de sink.
  - Chapitre 5 : faire une comparaison entre les deux protocoles BOSS et Geraf à travers les résultats obtenus.

Et à la fin, une conclusion générale sur ce travail sera présentée.

---

---

# **PARTIE I : Etat de l'art**

---

---



# **Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil**

## 1.1 Introduction

L'évolution récente dans le domaine de la micro-électronique et des technologies de communication sans fil permet de produire des petits appareils sans fil appelé capteur. Le déploiement de plusieurs capteurs dans un environnement d'intérêt forme un réseau de capteurs sans fil (RCSF), en anglais Wireless Sensor Networks (WSN). Les capteurs sont déployés dans un environnement à observer pour récolter des informations (la température, l'humidité, la pression, etc.) et de les envoyés vers une station de base appelée sink.

## 1.2 Classifications des réseaux sans fil

Un réseau sans fil (wireless network) est un réseau informatique ou un réseau de télécommunication qui utilise les ondes radio pour relier les différents nœuds entre eux.

Les ondes radio sont : onde hertzienne, infrarouge, Bluetooth ... etc.

Les nœuds pour un réseau informatique peuvent être des modems, des routeurs, des switches, des ordinateurs et des imprimantes, alors que les nœuds pour un réseau de télécommunications peuvent être des commutateurs, des stations mobiles, des stations de base ... etc.

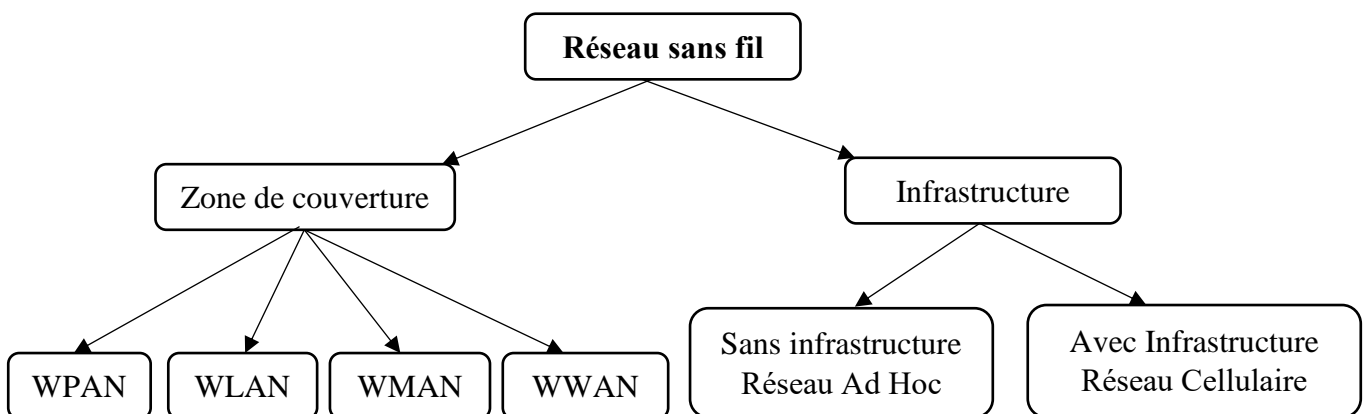


Figure 1.1 – Classification des réseaux sans fil [30]

### 1.2.1 Classification selon la zone de couverture

La classification selon la zone de couverture donne quatre classes des réseaux différents : WPAN, WLAN, WMAN et WWAN.

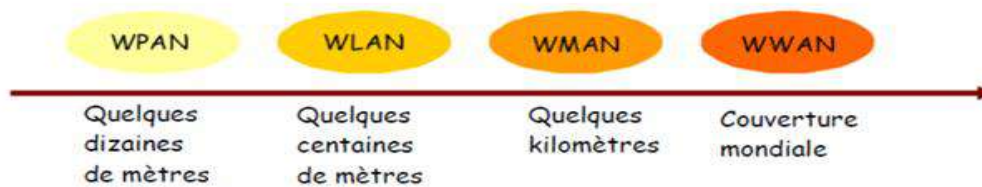


Figure 1.2 – Classification des réseaux sans fil suivant leur taille [31]

- **Les WPAN (Wireless Personal Area Networks)**

Le réseau personnel sans fil concerne les réseaux sans fil d'une faible portée à l'ordre de quelques dizaines de mètres. Il utilise les technologies comme infrarouge, ZigBee et Bluetooth.

- **Les WLAN (Wireless Local Area Networks)**

Le réseau local sans fil peut couvrir une zone va jusqu'à 500 m, il est basé sur les technologies comme Wi-Fi (Wireless-Fidelity) et HiperLAN 2 (High Performance LAN 2.0)

- **Les WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks)**

Le réseau métropolitain sans fil est connu sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Il peut couvrir une zone entre 4 et 10 kms, Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16, qui est utilisé par technologie WIMAX aux opérateurs de télécommunications.

- **Les WWAN (Wireless Wide Area Networks)**

Le réseau étendu sans fil est la catégorie des réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large, à l'échelle mondiale. Basé sur des technologies cellulaires comme GSM, GPRS et UMTS.

### 1.2.2 Classification selon l'infrastructure

Les réseaux mobiles ce sont des réseaux sans fil qui permettent d'accéder à l'information indépendamment de leur position géographique. Ces réseaux peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.

- **Réseaux avec infrastructure (cellulaire)**

Ce type de réseaux se compose des éléments suivants [1] :

1. Les "sites fixes" sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.
2. Les "sites mobiles" (réseaux sans fils) sont composés de plusieurs cellules, chaque cellule contient une station de base à partir de laquelle des unités mobiles (UM) peuvent émettre et recevoir des messages. Les différentes stations de base sont reliés entre eux et/ou au réseau internet. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.

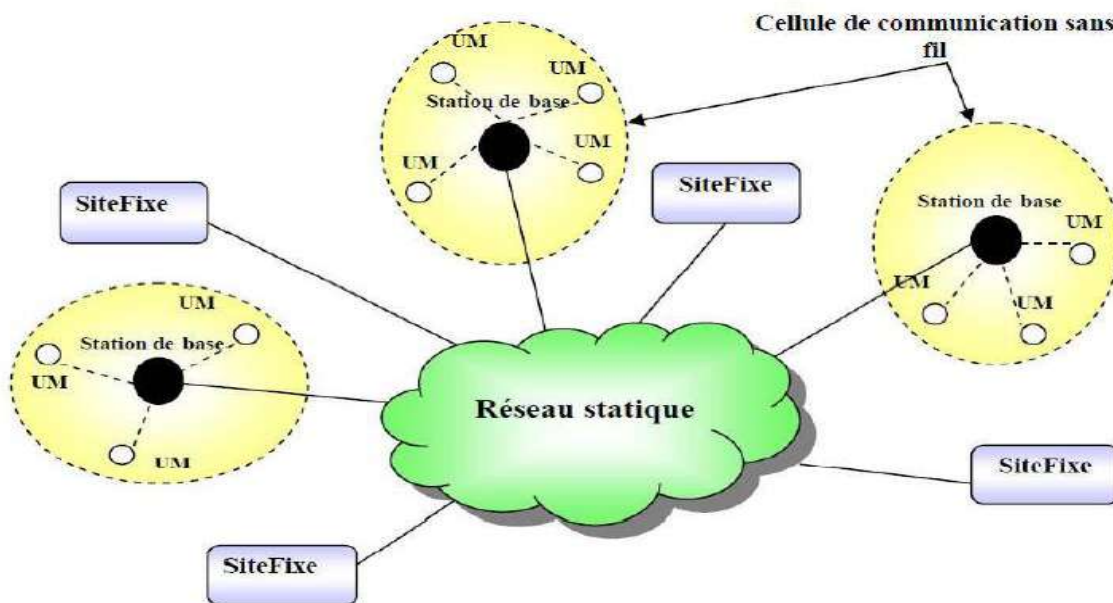


Figure 1.3 – Réseaux cellulaires [30]

- **Réseaux sans infrastructure (Ad hoc)**

Un réseau ad hoc n'est composé que des sites mobiles qui communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. Alors l'absence de l'infrastructure oblige les unités mobiles se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte des chemins pour les autres hôtes du réseau pour permettre le passage de l'information d'un hôte vers un autre sans que ces dernières soient reliées directement.

## 1.3 Les réseaux mobiles Ad Hoc

### 1.3.1 Définition d'un réseau ad hoc

Un réseau ad hoc appelé généralement MANET (**M**obile **A**d hoc **N**etwork, du nom du groupe de travail qui a créé ce protocole), ce réseau est constitué d'un ensemble de nœuds mobile qui se déplacent d'une façon libre, le seul moyen de communication est les ondes radio. Chaque nœud peut communiquer directement (mode point-à-point) avec n'importe quel nœud adjacent situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires (mode multi-sauts) ; dans ce cas-là les nœuds se comportent comme un routeur afin de permettre la communication entre les nœuds éloignés [32].

Le terme latin "ad hoc", qui peut être littérairement traduit en "pour ceci " ou "pour cet objectif seulement" [33].

### 1.3.2 Type des réseaux ad hoc

Nous citons les quatre types de réseau ad hoc à savoir :

- a) **Les MANET (Mobile Ad hoc Networks)** : réseau mobile ad hoc est une collection d'unités mobiles interconnectées entre eux par une liaison sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à une administration centralisée ou une infrastructure fixe, dans le but de l'accès à l'information n'importe où et n'importe quand. Chaque nœud du réseau à un instant donné peut jouer le rôle d'un hôte (émetteur/récepteur) ou un routeur qui participe au routage des paquets de données [34].
- b) **Les WMN (Wireless Mesh Networks)** : réseaux maillés sans fil repose sur plusieurs points d'accès wifi équipés d'une fonctionnalité de routage et interconnectés par des liens radios, qui agissent comme un seul réseau wifi. Plus vous avez de point d'accès wifi réparties sur le champ à couvrir, plus la connexion est performante [2].
- c) **Les WSN (Wireless Sensor Networks)** ou RCSF : réseau de capture sans fil constitué d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un point de collecte appelé sink, à l'aide d'une connexion sans fil [35].
- d) **Les VANET (Vehicular Ad Hoc Networks)** : réseaux véhiculaires ad hoc sont utilisés pour la communication entre véhicules et équipements routiers.

### 1.3.3 Les caractéristiques des réseaux ad hoc

Les réseaux Ad Hoc sont caractérisés principalement par :

- 1) **Contrainte d'énergie** : la durée de vie d'un hôte mobile dans un réseau ad hoc est rattachée directement à la durée de vie de sa batterie. Par conséquent, le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système [36].
- 2) **Sécurité physique limitée** : la sécurité dans les réseaux ad hoc est difficile à contrôler, parce que l'écoute clandestine est très simple à réaliser à travers l'interface air [33].
- 3) **Mobilité** : la mobilité arbitraire des nœuds du réseau implique un changement rapide de la topologie du réseau ad hoc. Par conséquent, un changement des routes entre les nœuds et la perte de paquets [36].
- 4) **Interférence** : les liens des ondes radio ne sont pas isolés. Alors, deux transmissions simultanées sur une même voie de fréquence qui utilisant des fréquences proches peuvent facilement être interférées les uns des autres.
- 5) **Absence d'infrastructure** : l'absence d'infrastructure et l'absence d'une administration centralisée du réseau sans fil. Cela implique, que les hôtes doivent établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue [36].
- 6) **Erreurs de transmission** : les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes dans les réseaux mobiles ad hoc que dans les réseaux filaires [35].
- 7) **Bande passante limitée** : l'utilisation d'un médium de communication partagé entre les hôtes du réseau, implique une bande passante réservée à un hôte soit modeste.

## 1.4 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

### 1.4.1 Définition d'un capteur sans fil

Un capteur (dit sensor en anglais) est un dispositif électronique de taille très réduite avec des ressources (RAM, CPU énergie) très limitées, capable à la fois de mesurer des données physiques environnementales (température, vibration, son, pression, image, humidité, ...) et de les communiquer à un centre de contrôle via une station de base appelée sink.

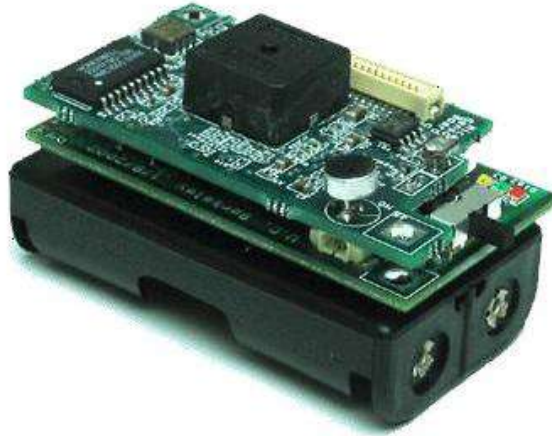


Figure 1.4 – un capteur sans fil [37].

### 1.4.2 Composants d'un capteur sans fil

Un capteur sans fil est composé de 4 unités de base :

**1) Unité d'acquisition** : est généralement composée de capteur et convertisseur.

Le capteur est composé de deux sous-unités [37] :

- Le récepteur (reconnaissant l'analyste) qui permet d'obtenir les mesures sur le phénomène observé.
- Le transducteur qui permet de convertir le signal du récepteur en signal électrique (signal analogique)

Le convertisseur Analogique-Numérique (CAN, en anglais ADC<sup>1</sup>) transforme le signal analogique en signal numérique et le transmette à l'unité de traitement.

<sup>1</sup> ADC : Analog to Digital Converter (convertisseur analogique numérique)

**2) Unité de traitement :** est constitué d'un processeur qui supporte un système d'exploitation spécifique (TinyOS, par exemple) et une mémoire pour le stockage de données. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Cette unité est chargée aussi d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs.

**3) Unité de communication :** est équipée d'un radio et d'une antenne [37]. Elle est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil.

**4) Unité d'énergie :** la batterie est responsable de l'alimentation des différentes unités en énergie. La ressource énergétique dont elle dispose est limitée et généralement irremplaçable, pour cela cette unité réduit les dépenses en mettant en veille les composants inactifs et utilise d'autres ressources d'énergie pour le rechargement de batterie comme les cellules solaires. Souvent, dans les environnements hostiles il est impossible de recharger ou changer une batterie. Dans ce cas la durée de vie du nœud peut être déterminée par la vie de la batterie, ce qui exige la minimisation des dépenses énergétiques.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que :

- Un système de localisation comme GPS (Global Positioning System).
- Un mobilisateur lui permettant le déplacement en cas de nécessité.
- Un capteur vidéo (caméra).

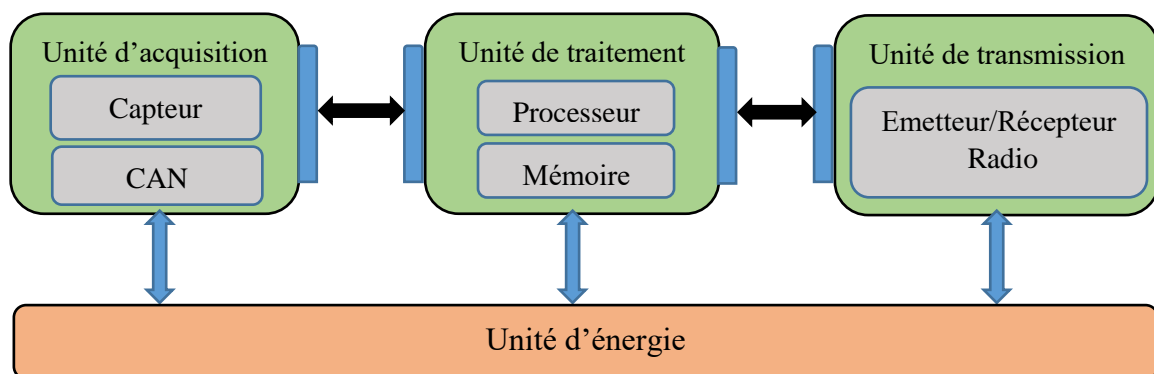


Figure 1.5 – Architecture d'un capteur sans fil [38]



### 1.4.3 Définition d'un RCSF ou WSN (Wireless Sensor Network)

Les réseaux de capteurs sans fil sont un cas particulier des réseaux sans fil sans infrastructure (réseaux ad hoc), composé d'un grand nombre de nœuds capteurs déployés de façon aléatoire ou déterministe dans une zone à observer appelé zone de captage. Ces nœuds sont chargés de surveiller un phénomène et récolter des données d'une manière autonome et immédiate. Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées avec un routage multi sauts vers un nœud collecteur appelé nœud sink qui va transmettre, via internet ou satellite, ces informations à l'utilisateur du réseau [39].

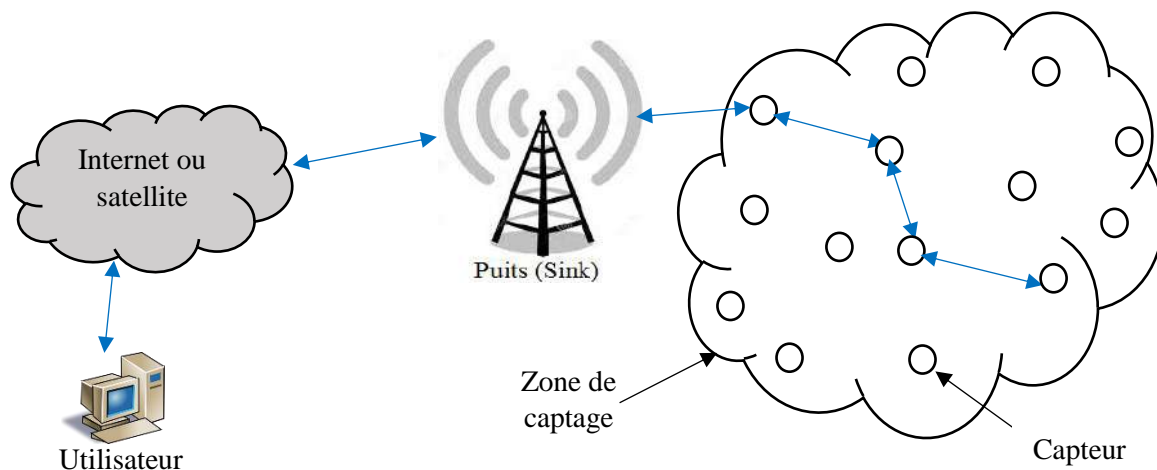


Figure 1.6 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil

### 1.4.4 Domaines d'application des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21<sup>ème</sup> siècle [40]. La recherche dans ce domaine subit actuellement une révolution importante et les améliorations dans la technique de construction du capteur sans fil telle que la taille réduite, le coût de plus en plus faible ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines, nous citons ici quelques domaines très importants :

**Domaine de l'environnement :** le déploiement des capteurs dans une forêt peut signaler un éventuel début de feu ; ce qui permettra une meilleure efficacité pour la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs dans les sites industriels tels que les centrales nucléaires et pétrolières pour détecter de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. De même leur déploiement dans les milieux urbains permet la détection et la mesure de la pollution de l'air.

**Domaine militaire :** en raison de sa rapidité de déplacement, d'auto-configuration et de sa tolérance aux pannes, les RCSF ont contribué dans la surveillance et la collecte d'informations sur les forces ennemies dans le champ de bataille. Ainsi que la reconnaissance d'attaque avant d'envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations). Actuellement, les RCSF joueront un rôle plus important dans les futurs systèmes militaires et rendront les futures guerres plus "intelligentes" avec moins d'implication humaine.

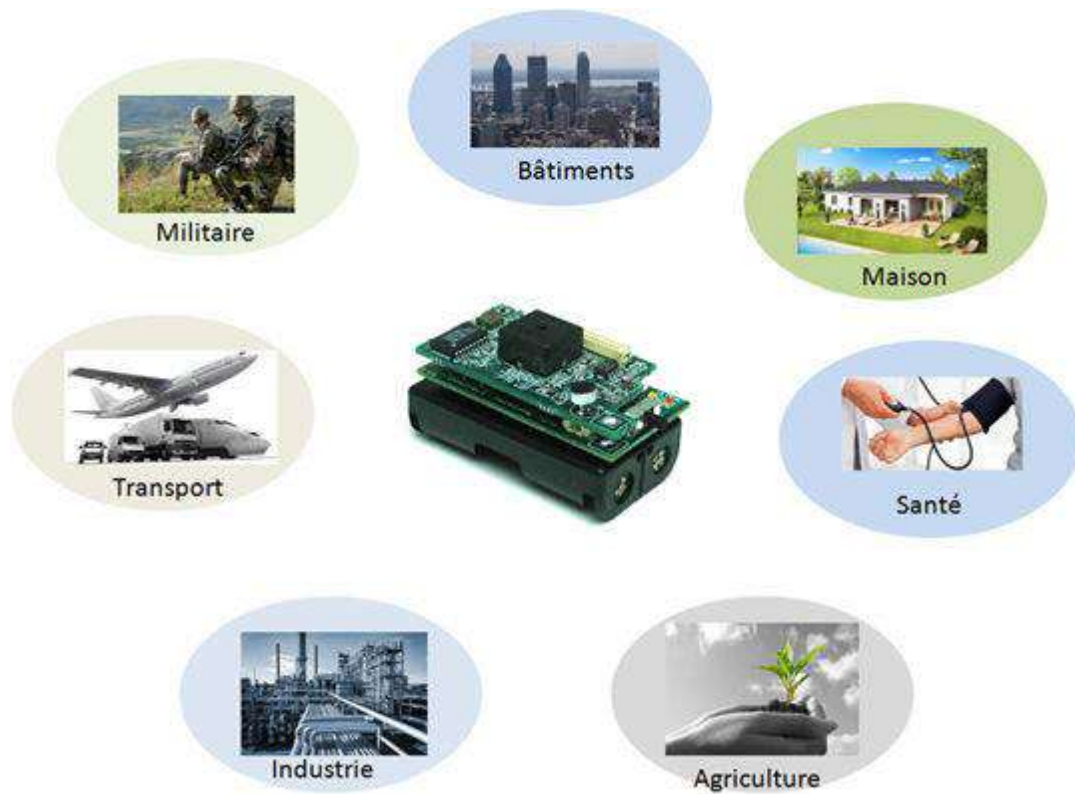


Figure 1.7 – Domaines d'applications [41].

**Domaine médical :** les RCSF peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente de l'état de santé des patients qu'ils soient à l'hôpital ou ailleurs grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, le glucose, le rythme Cardiaque, détection de cancer, ...). Actuellement, une micro-caméra avalée par le patient permet de transmettre des images de l'intérieur du corps humain avec une autonomie de quelques heures.

**Domaine domotique :** en plaçant des capteurs sans fil sur le plafond ou dans le mur pour la collecte des paramètres, par exemple : la température, le mouvement, la pression, l'humidité et la luminosité ; nous a permis de construire des maisons confort et intelligent qui s'adaptent automatiquement au

comportement des individus par :

- L'éclairage, le chauffage et la climatisation en fonction de la localisation des personnes.
- Le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.

#### 1.4.5 Modèle de communication dans les RCSF

Les RCSF utilisent une architecture de communication en cinq couches seulement parmi les sept couches standard définies dans le modèle OSI ; la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Ces couches ont les mêmes rôles que celles de la pile OSI. Ainsi que cette pile de communication pour les RCSF comporte trois autres plan de gestion dédiées respectivement pour la gestion de l'énergie, la gestion de la mobilité et celle de la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs) [40].

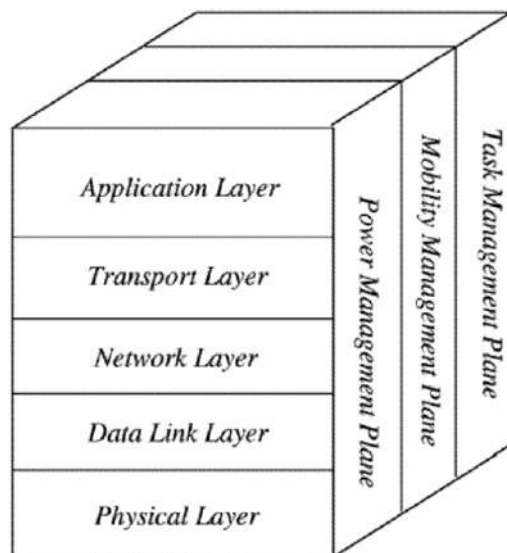


Figure 1.8 – Modèle en couche pour la communication dans les RCSF [40]

**Rôle des couches :**

- **La couche physique** : assure la transmission et la réception des données au niveau bit.
- **La couche liaison de données** : permet la gestion des liaisons entre les nœuds et les stations de base. Elle permet aussi le contrôle d'erreurs.
- **La couche réseau** : cette couche s'occupe du routage de données et la découverte de voisin.
- **La couche transport** : assure le transport des données et le contrôle de flux.
- **La couche application** : assure l'interface avec les applications.
- **Le plan de gestion de l'énergie** : contrôle l'utilisation de l'énergie. Par exemple un capteur peut éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser à ses voisins un message pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante au captage.
- **Le plan de gestion de la mobilité** : détecte et enregistre les mouvements du nœud capteur, d'une manière à leur permettre de garder des traces sur l'ensemble de ses nœuds voisins. Parfois un changement de position est nécessaire à cause de la destruction de quelques nœuds.
- **Le plan de gestion des tâches** : assure l'équilibrage des efforts des nœuds capteurs et l'ordonnancement des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'économiser de l'énergie. Les nœuds qui appartiennent à la même zone de captage ne doivent pas obligatoirement effectuer en même temps une tâche donnée. Certains nœuds capteurs peuvent accomplir cette tâche de capture au moment où d'autres nœuds vont se mettre dans le mode éteint afin de sauvegarder leur énergie. Ainsi, prolonger la durée de vie du réseau.

**1.5 Conclusion**

Nous avons vu dans ce chapitre le réseau ad hoc et ses caractéristiques ensuite nous avons présenté le réseau de capteurs sans fil, qui est un type particulier de réseau ad hoc. Puis nous avons étudié le capteur et ses composantes et à la fin on a présenté quelques domaines d'application des RCSF, par laquelle nous déduisons la grande importance du RCSF dans le domaine de la collecte de l'information.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

## **Chapitre 2 : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

## 2.1 Introduction

Dans un réseau de capteurs sans fil, les données captées par les nœuds sont acheminées vers la station de base (sink) grâce à un routage multi-saut à un nœud. Alors, les capteurs se communiquent entre eux en utilisant un protocole de routage pour l'acheminement des données de proche en proche vers la station de base à moindre coût en matière d'énergie. Donc, le problème du routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau en utilisant les capteurs sans fil comme source ou relais et prendre en considération la contrainte de ressource limitée des capteurs (calcul, stockage, batterie, etc.). En effet, le protocole de routage qui permet de réduire la consommation d'énergie participe à l'amélioration de la durée de vie du réseau.

## 2.2 Contraintes de conception de protocoles de routage pour RCSF

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte dans la conception des RCSF [5] :

- Limitations :
  - ✓ Contraintes d'énergie : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau.
  - ✓ Bande passante
  - ✓ Puissance de calcul : les protocoles réseau ne doivent pas être complexe.
- Absence d'adressage global : Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds
- Données redondantes : les différents capteurs peuvent générer les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- Réseau à sources multiples vers destination unique : les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale « station de base ».
- Gestion des ressources, en particulier la ressource d'énergie.
- Stockage

## 2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage dans les RCSFs peuvent être divisés en trois catégories [6,7] :

- La structure de réseau
- Le processus de découverte des routes
- La stratégie de routage du protocole

Cependant, il existe certains protocoles de routage peuvent être classés dans plus d'une classe et sous-classe tel qu'illustré par le tableau 2.1.

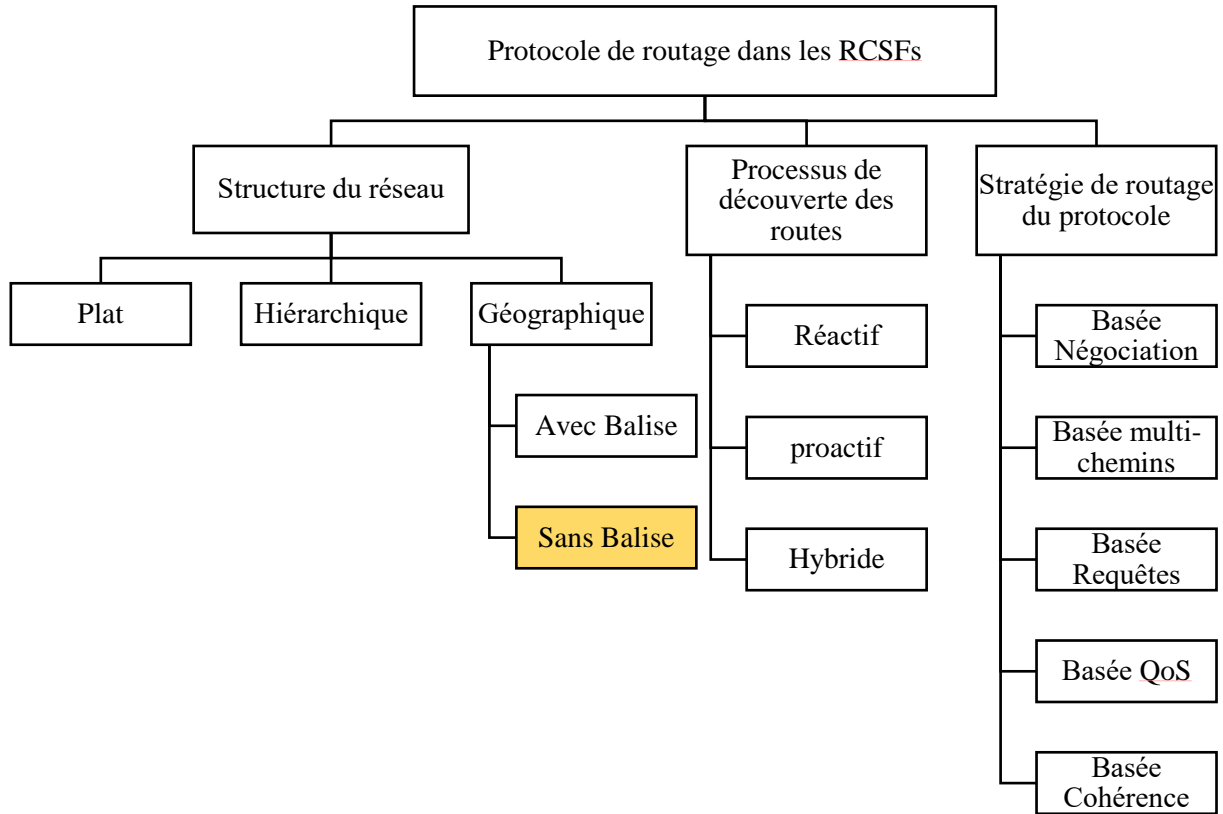


Figure 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les RCSF [9]

Protocoles	Caractéristiques
SPIN	Topologie plate, centré-données, basé-requêtes, basé-négociation, basé-cohérence
Directed diffusion	Topologie plate, centré-données, basé-requêtes, basé-négociation, basé-cohérence
Rumeur routing	Topologie plate, centré-données, basé-requêtes
OLSR	Topologie plate, proactif
PEGASIS	Hiérarchique
GPSR	Géographique, unicast
DSR	Topologie plate, réactif
SAFARI	Hiérarchique, hybride
SPEED	Géographique avec QoS (temps-réel)

Tableau 2.1 – Caractéristiques de quelques protocoles de routage [9]

### 2.3.1 Classification selon la stratégie de routage du protocole

Les protocoles de routage sont classés selon le fonctionnement de routage du protocole

#### 1) Protocoles basés sur la négociation

La stratégie de routage basé sur la négociation entre les nœuds capteurs avant la transmission des données assure que seules les informations non redondantes seront transmises [6, 10] :

Exemple de ces protocoles :

- Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [11]
- Sequential assignment routing (SAR) [12]
- Directed Diffusion (DD) [13]

#### 2) Protocoles basés sur les multi-chemins

L'envoi d'un paquet de données à travers plusieurs chemins multiples simultanément permet d'assurer l'arrivée au moins un paquet à la destination, cette technique permet d'augmenter la fiabilité de la transmission de données. En plus plusieurs chemins seront bénéfiques dans le cas de défaillance d'un nœud capteur ou une liaison. Parmi ces protocoles, on trouve [6] :

- Multi Path and Multi SPEED (MMSPEED) [14]
- Sequential assignment routing (SAR) [12]

#### 3) Protocoles basés sur les requêtes

Ce type de protocole fonctionne sur l'envoi et la réception de requête de données. Le nœud de destination envoie une requête à travers le réseau afin d'obtenir des données, le nœud qui possède les données correspondant à la requête émise, les envoie au nœud initiateur de requête. Les requêtes sont décrites dans un langage de haut niveau [6, 10]. Exemple de ces protocoles :

- Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [11]
- Directed Diffusion (DD) [13]

#### 4) Protocoles basée sur la QoS

L'objectif de ce type de protocole est de satisfaire certaines métriques de la QoS, pendant la transmission des données vers la destination. Parmi ces métriques, nous citons : une faible consommation d'énergie, une faible latence ou un faible taux de perte de paquets [6, 10].

Exemple de ces protocoles :

Sequential assignment routing (SAR) [12]

Multi path and Multi SPEED (MMSPEED) [14]



## 5) Protocoles basés sur la cohérence

Les protocoles de routage cohérents effectuent un traitement minimal sur les données comme l'élimination des doublons, avant que les données ne soient envoyées aux destinataires. Ensuite les données seront envoyées aux nœuds appelés agrégateurs de données qui effectuent un autre traitement sur les données [6, 15].

Exemple de ces protocoles :

- Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [11]
- Directed Diffusion (DD) [13]

### 2.3.2 Classification selon Processus de découverte des routes

Les protocoles de routage sont classés selon le processus de découverte des routes pour l'acheminement des données entre les nœuds sources et les nœuds destinations.

#### 1) Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (dits aussi protocoles de routage à la demande) détectent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, un processus de découverte de routes est lancé. Par conséquent des retards avant la transmission seront détectés [6, 16, 17, 18]. Un exemple de ces protocoles : AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector) [19]

#### 2) Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs utilisent les tables de routages au niveau de chaque nœud pour sauvegarder tous les chemins possibles vers toutes les destinations ainsi que les coûts avec chaque prochain saut [6, 16, 17, 18]. Le plus connu de ces protocoles est OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) [19].

#### 3) Protocoles hybrides

Dans ce type de protocole, ils utilisent une approche proactive pour connaître le proche voisinage à un nombre prédéfini de sauts. Les routes vers les nœuds plus lointains sont obtenues par l'utilisation d'une approche réactive. Le plus connu de ces protocoles est ZRP (Zone Routing Protocol) [17, 18].

### 2.3.3 Classification selon la structure du réseau

La classification selon la structure détermine l'organisation des nœuds capteurs dans le réseau.

#### 1) Protocoles de routage à plat

Tous les nœuds du réseau sont identiques et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire sauf le nœud sink, qui est chargé de collecter toutes les informations provenant de différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers l'utilisateur final. Exemple de ces protocoles [6, 12, 17] :

- Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [20]
- Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA) [22]
- Energy Aware Routing (EAR) [21]

#### 2) Protocoles de routage géographique

L'idée des protocoles de routage géographique est d'utiliser les positions géographiques des nœuds pour prendre les décisions de routage. Les prés-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont :

- Tous les nœuds du réseau possèdent un moyen de localisation, soit par un système comme GPS (Global Position System), soit par un logiciel comme un protocole de localisation
- Tous les nœuds connaîtront la position de la destination finale (sink).

Exemple de ces protocoles :

- Sequential assignment outing (SAR) [12]
- Sd-hoc positioning system (APS) [23]
- Geographic adaptive fidelity (GAP) [24]
- Greedy other adaptive face routing (GOAFR) [6]

#### 3) Protocoles de routage hiérarchique

Le principe de routage hiérarchique consiste à partitionner le réseau en sous-ensemble de nœuds et pour chaque sous-ensemble en désigne un super nœud appelé passerelle (ou cluster-head). Donc les sous-ensembles de nœuds communiquent entre eux à travers les nœuds passerelles. Cette technique permet de faciliter la gestion du réseau et réduire la consommation d'énergie lors de l'acheminement de paquet de données à travers le réseau [6, 12, 17]. Exemple de ces protocoles:

- Hierarchical Power-Active Routing (HPAR) [26]
- Threshold sensitive energy efficient sensor network protocol (TEEN) [25]

## 2.4 Protocole de routage géographique

Le principe des protocoles de routage géographique est de transmettre le paquet dans la direction de la destination. Les protocoles de routage géographique se basent sur les positions des nœuds pour expédier les informations vers la destination définie [27]. Ils n'ont pas besoin de maintenir des tables de routages ou calculer des routes. En effet, pour acheminer les paquets de données, tout nœud du réseau doit connaître :

1. Sa position grâce à un mécanisme de localisation (soit par un système natif intégré comme le GPS<sup>2</sup>, soit par un système logiciel comme un protocole de localisation).
2. La position de la destination finale peut être fixe et enregistrée dans chaque nœud ou être contenue dans le paquet transitant.

Les protocoles de routage géographique sont très adaptés aux réseaux de capteurs sans-fils car ils minimisent les coûts en mémoire et le travail des nœuds en évitant des communications superflues.

En plus de sa simplicité, le routage géographique est très apprécié et offre de bonnes performances aux RCSF en raison de ses caractéristiques [27] :

- **Localité** : les décisions d'acheminement et routage des paquets sont prises en utilisant les informations locales seulement.
- **Fonctionnement distribué** : le même algorithme sera exécuté sur tous les nœuds.
- **Sans état et sans mémoire** puisque les décisions sont prises à chaque étape et indépendamment des choix précédents, un nœud n'a donc pas besoin de garder des tables de routage.
- **Absence des boucles** : en essayant de progresser à chaque étape on évite les boucles dans les routes.
- **Évolutif/passage à l'échelle** : toutes les caractéristiques citées ci-dessus améliorent la flexibilité du routage géographique dans les réseaux de grande échelle et de densité croissante.

Le mécanisme de balisage dans le routage géographique exige que les nœuds transmettent périodiquement des balises (messages hello, beacons en anglais) à un saut (one-hop) afin de permettre aux voisins de connaître leur position. Pour réduire la charge de contrôle due à ces messages, des algorithmes de routage sans balises (beacon-less) ont récemment été proposés [3].

---

<sup>2</sup> GPS : Global Position System

## 2.5 Stratégies de routage géographique

Différentes stratégies de routage géographique (mode de transmission) ont été proposées. Nous expliquons ci-dessous quelques stratégies d'acheminement :

### 2.5.1 Routage géographique en mode glouton (Greedy Forwarding)

Dans ce mode chaque nœud transmet le paquet au voisin qui minimise la distance euclidienne à la destination. Le but est de se rapprocher de la destination à atteindre en sélectionnant le voisin le plus proche de la destination à chaque étape [28]. Dans la figure 2-3, y est le voisin de x le plus proche de la destination D.

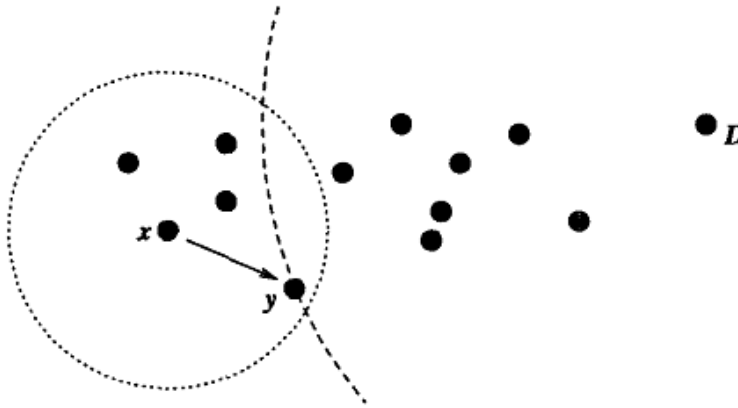


Figure 2.2 – Exemple de Greedy Forwarding. [28]

### La distance euclidienne

La distance euclidienne entre de point  $a(x_1, y_1)$  et  $b(x_2, y_2)$  est :

$$d(a,b) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

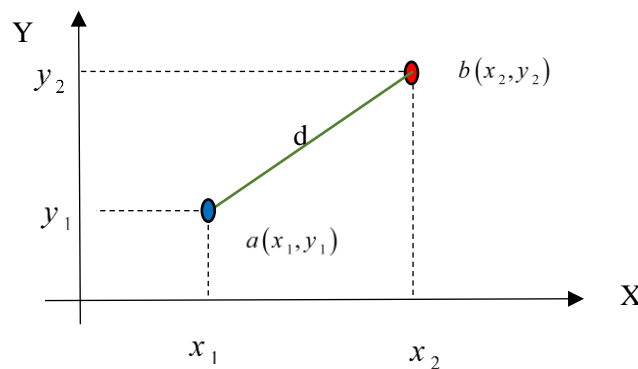


Figure 2.3 – La distance entre 2 points

Parfois, la méthode gloutonne peut échouer ; atteindre un nœud où aucun voisin plus proche de la destination n'existe. Dans ce cas, une stratégie de récupération doit être utilisée pour entourer la zone vide atteinte. Dans la figure 2-4, nous constatons que  $x$  est aussi proche de  $D$  que ses voisins  $w$  et  $y$ . Bien que deux chemins mènent à la destination ( $x-y, y-z, z-D$ ) et ( $x-w, w-v, v-D$ ), le nœud  $x$  ne choisit aucun d'eux. Pour sortir de cette situation problématique nous utilisons le mode périmètre (la règle de la main droite).

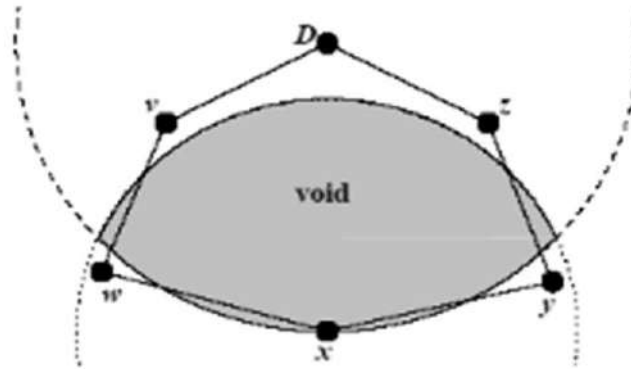


Figure 2.4 – Présence d'un trou [28]

### 2.5.2 Routage géographique en mode périmètre (Perimeter Forwarding)

Le mode périmètre consiste à transmettre un paquet à sa destination finale en utilisant la règle de la main droite (Right Hand Rule en anglais), qui consiste à router le paquet autour du trou dans le sens contraire des aiguilles d'une montre jusqu'à atteindre un nœud capable d'effectuer la progression gloutonne [29].

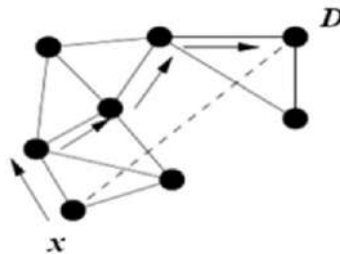


Figure 2.5 – mode périmètre [28]

### 2.5.3 Routage géographique en mode glouton et périmètre

Cette stratégie utilise le mode glouton pour router les paquets de données vers les nœuds qui diminuent plus la distance à la destination, en cas d'échec (rencontre d'un trou par exemple), en passe à la mode périmètre qui utilise la méthode de main droite [28, 29].

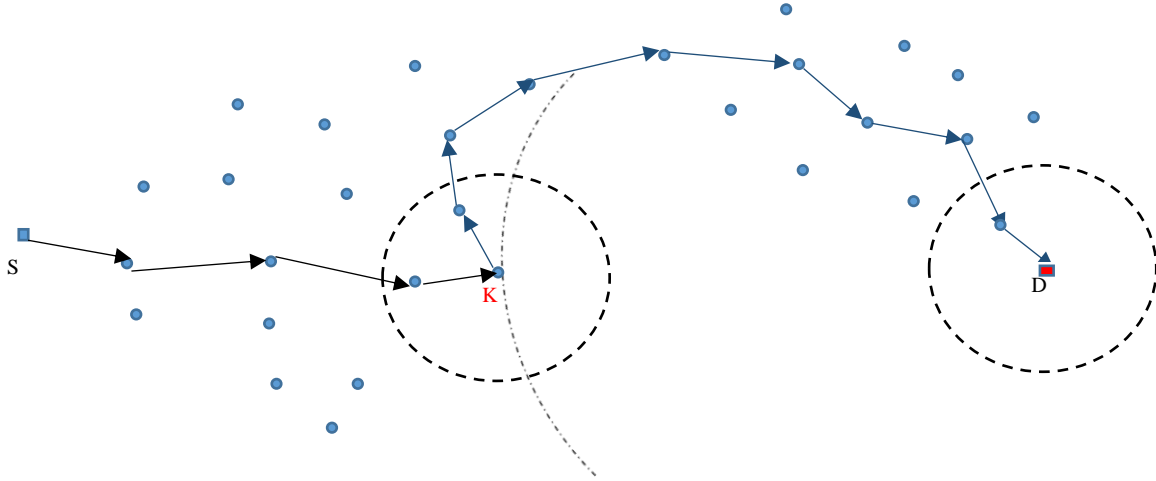


Figure 2.6 – Mode glouton et périmètre [29]

Le nœud K n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif vers D (Figure 2.6). Le nœud K ne peut plus faire progresser le paquet en utilisant le routage glouton. Donc le passage vers le mode périmètre est nécessaire.

## 2.6 Catégorie de routage géographique

Les protocoles de routage géographiques sont classés en deux catégories :

- Les protocoles de routage géographique avec balise (beacon)
- Les protocoles de routage géographique sans balise (beacon-less)

### 2.6.1 Protocole de routage géographique avec balise

Les protocoles de routage géographique basé sur des balises, utilisent des tables pour stocker les positions des voisins à un saut. Des mises à jour sur ces tables sont nécessaires. Pour ce faire les nœuds doivent envoyer périodiquement des messages hello appelés balises contiennent leur position [3].

Ce mécanisme de balisage, pose certains problèmes, tels que :

- Une surcharge de communication supplémentaire.
- La consommation d'énergie et de bande passante.
- La génération d'interférences avec la transmission de données régulière.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs protocoles de routage sans balise ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil.

### 2.6.2 Protocole de routage géographique sans balise

Les protocoles de routage géographique sans balise (Beacon-less) ont été proposés dans le but de pallier les problèmes liés à l'utilisation des balises dans un environnement mobile. Ces protocoles n'utilisent pas les balises (message hello) périodiques pour acquérir des informations sur les positions de ses voisins. Par contre, la découverte du voisinage est faite uniquement à la demande à travers un mécanisme de sélection du prochain saut d'un message [27]. Le nœud qui détient actuellement le paquet de donnée détermine le prochain saut (relais) parmi ses voisins. Pour cela, il diffuse ses informations de localisation aux voisins. Les voisins utilisent ces informations et contribuent au processus de routage. Par conséquent, les demandes de bande passante, mémoire et d'énergie liée à l'échange d'informations sont diminuées [3].

Plusieurs protocoles de routage géographique sans balises sont conçus, tels que :

- BLR (beacon-less routing algorithm)
- IGF (A State-Free Robust Communication Protocol)
- GeRaF (Geographic Random Forwarding routing protocol)
- BOSS (Beacon-less On Demand Strategy) dont il fait l'objet de notre étude.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le routage dans les RCSF et nous avons présenté les différentes classifications des protocoles de routage selon la structure de réseau, la découverte des routes et la stratégie de routage. Ensuite, nous avons abordé le routage géographique qui repose sur la notion de position des nœuds pour prendre des décisions de routage.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le protocole BOSS.

---

---

## **PARTIE II : Contribution**

---

---



# **Chapitre 3 : Présentation du protocole BOSS**

### 3.1 Introduction

Le protocole BOSS (Beacon-Less On Demand Strategy) [3] est un protocole de routage géographique sans balise. Il est proposé dans le but de répondre aux problèmes d'erreurs de transmission et des collisions typiques des communications radio. BOSS utilise une fonction discrète de délai de transmission basé sur les sous-zones (voir Figure 3.2) afin de réduire les collisions des réponses pendant la phase de sélection du prochain saut. Il se base sur un mécanisme de 3-way handshake : DATA-REPOUSE-SELECTION pour sélectionner le prochain saut d'un message [3, 4]. Ainsi, BOSS commence à envoyer le paquet de données plutôt qu'un message de contrôle. Ensuite, le nœud qui répond en premier sera sélectionné comme le prochain saut d'un message [3, 4].

### 3.2 Définition de la zone de progression

Autour du nœud de source existe deux zones [3] :

- Zone de progression positive (ZPP) : comprend chaque nœud dont la position est plus proche de la destination que le nœud source. Dans la figure 3.1 : n1, n2 et n3 se trouvent dans la ZPP.
- Zone de progression négative (ZPN) : comprend le reste des voisins qui ne fournissent pas de progression positive vers la destination. Dans la figure 3.1 : n4 et n5 se trouvent dans la ZPN.

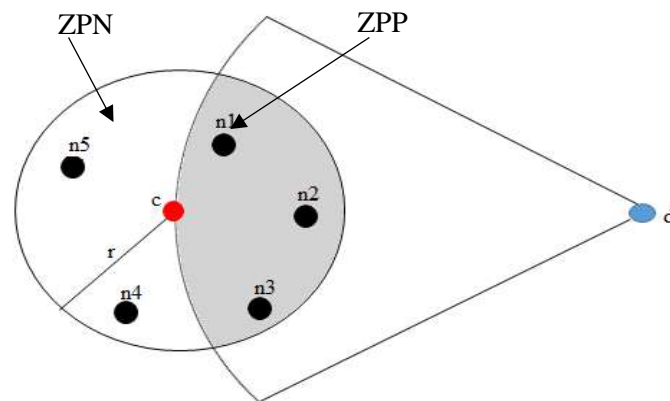


Figure 3.1 – La zone de progression [3]

### 3.3 Délai de transmission dynamique discret (DDFD<sup>3</sup>)

Tous les nœuds voisins après la réception du paquet DATA, attendent un certain temps avant de répondre au nœud source. Ce temps d'attente est lié à leur position.

L'utilisation de délai de transmission dynamique discret (DDFD) permettant de réduire les collisions des réponses pendant la phase de sélection [3].

La fonction de délai de transmission dynamique discret (DDFD) attribue le délai le plus court aux voisins les plus proches à la destination par rapport aux autres voisins, ce qui permet de progresser au maximum vers la destination.

Chaque voisin calcule son temps de réponse selon l'équation suivante :

$$T = \left( CSA * \frac{T_{\max}}{NSA} \right) + random \left( \frac{T_{\max}}{NSA} \right) \quad (1)$$

$T_{\max}$  : Le temps de retard maximal pendant lequel un nœud source attend les réponses de ses voisins.

Random(x) : une fonction qui donne une valeur aléatoire comprise entre 0 et x.

CSA : représente le numéro de région (Common Sub Area),  $CSA \in [0, NSA - 1]$  (Figure 3.2)

NSA : représente le nombre total de région (Number of Sub Area)

Chaque nœud doit connaître son numéro de la région par la formule suivante :

$$CSA = \left\lceil NSA * \frac{r - P(n, d, c)}{2r} \right\rceil \quad (2)$$

r : la portée radio

la fonction  $P(n, d, c) = \text{Distance}(\text{source}, \text{sink}) - \text{Distance}(\text{relais}, \text{sink})$

représente la différence entre la distance euclidienne d(source, destination) et d(relais, destination)

$$P(n, d, c) = d(c, d) - d(n, d) = \sqrt{(c_x - d_x)^2 + (c_y - d_y)^2} - \sqrt{(n_x - d_x)^2 + (n_y - d_y)^2} \quad (3)$$

c : nœud source

d : nœud destination

n : nœud relais (voisin)

d(c,d) : la distance euclidienne entre les positions des nœuds c et d.

<sup>3</sup> DDFD : the Discrete Dynamic Forwarding Delay (Délai de Transmission Dynamique Discret)

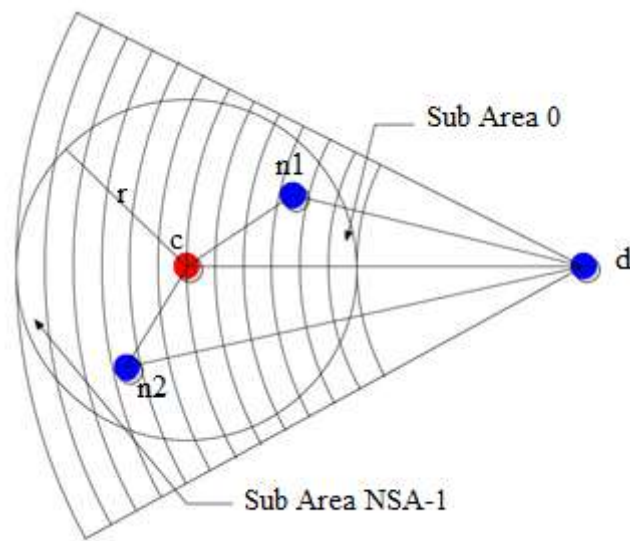


Figure 3.2 – Division en zone pour la DDFD [3]

### 3.4 Procédures de routage du protocole BOSS

Il y a trois phases de déroulement du protocole BOSS pendant la sélection du prochain saut [3, 4]; c'est le même principe du mécanisme de prise de contact à trois vois pour sélectionner et transférer des messages (Figure 3.3):

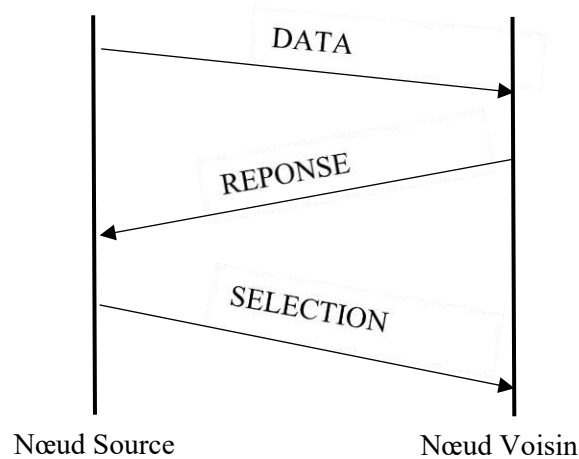


Figure 3.3 – Mécanisme de 3-way handshake du BOSS

### 3.4.1 Phase de diffusion d'un message DATA

Le nœud source envoie une diffusion broadcast dans son voisinage radio un message DATA qui contient la donnée à envoyer et attend une réponse de la part d'un de ses voisins pendant un délai maximum prédéfini  $T_{max}$  [3, 4].

Message\_DATA [DATA, position du nœud source, position du nœud destination].

#### Les règles de gestion :

Dans notre étude, on suppose qu'il n'existe pas une zone vide qui représente un blocage d'avancement vers le nœud sink.

### 3.4.2 Phase de l'attente d'une réponse

Chaque nœud voisin recevant le message DATA, l'enregistre et démarre un temporisateur dont la valeur dépend de sa position (voir paragraphe 3.3). Lorsque le temporisateur est terminé, le nœud voisin diffuse un message REPONSE [3, 4].

Message\_REPONSE [position du nœud voisin].

#### Les règles de gestion :

- Chaque voisin de la zone ZPN recevant un message DATA, supprime le message et il ne participe pas à la sélection ; pour cela on va lui mettre dans un état de sommeil pendant un laps de temps en millisecondes pour préserver son énergie de batterie.
- Chaque nœud voisin de la zone ZPP recevant un message REPONSE d'un autre voisin de la même zone annule son temporisateur et supprime le message DATA enregistré.
- Chaque nœud voisin envoyant un message REPONSE déclenche un temps d'attente  $T_{vmax}$ . A la fin de ce temps et pas de message SELECTION le message DATA sera supprimé

### 3.4.3 Phase de sélection du prochain saut

A la réception d'un message REPONSE, le nœud source arrête son temporisateur  $T_{max}$  et diffuse un message SELECTION qui contient la position du voisin sélectionné.

Message\_SELECTION [position du voisin sélectionné].

Pour confirmer la réception du message SELECTION [3, 4] ; BOSS utilise deux techniques différentes :

- Un acquittement passif (PACK) : entre les nœuds.
- Un acquittement actif (ACK) : entre le nœud et le sink.

Nous utilisons le message DATA du prochain saut en tant que PACK pour confirmer la réception du message SELECTION précédent. L'ACK est nécessaire lorsque le message arrive à sa destination (sink) car il n'y a plus de transfert de données [3, 4].

**Les règles de gestion :**

- Chaque voisin recevant le message SELECTION annulera son temporisateur  $T_{vmax}$  et supprimera le message DATA enregistré, à l'exception de celui sélectionné par le nœud source, ce dernier relance le processus en diffusant un message DATA.
- Si le nœud source ne reçoit ni PACK ni ACK après un temps d'attente  $T_{smax}$ , alors il renvoie le message SELECTION jusqu'à 3 fois au maximum. Lorsque la 3<sup>ième</sup> re-sélection échoue tout le processus est répété. Le nœud source envoie à nouveau le paquet DATA. Ce processus peut être essayé jusqu'à 10 fois. Après cela, le paquet est abandonné.
- À la réception d'un PACK ou un ACK, le paquet DATA sera supprimé au niveau du nœud source.

Enfin, chez BOSS les retransmissions sont rarement utilisées, les messages REPONSE et SELECTION étant nettement plus petits que le paquet DATA. Par conséquent leur probabilité d'être transmis avec succès est plus élevée [3, 4].

**3.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé notre protocole d'étude, qui est le protocole BOSS, qui utilise une nouvelle fonction d'affectation de délai d'attente dont la valeur dépend de la position du nœud appelé DDFD; ce délai a pour objectif de réduire les collisions pendant la phase de sélection. Enfin, nous avons détaillé les procédures de routage du protocole BOSS, cette étude nous facilite la simulation de ce dernier dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 4 : Implémentation et analyse des performances du BOSS**

## 4.1 Introduction

Pratiquement pour implémenter et tester le protocole Boss dans un environnement de réseau mobile sans fil, pose un problème par ce que cette opération nécessite de posséder un nombre important de nœuds (mobile, fixe). Dans ces conditions, la méthode la plus pratique et moins couteuse est d'utiliser un simulateur qui est capable de représenter les principales caractéristiques d'un réseau RCSF, et d'intégrer les protocoles de routage avec la possibilité de réaliser plusieurs scénarios dans un temps plus court. Pour cela nous avons choisi d'utiliser le simulateur OMNeT++ avec Castalia.

## 4.2 Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++)

OMNET++ est un environnement de simulation à évènements discrets. Utilisé pour la simulation des réseaux de communication, et d'autres systèmes distribués [1]. Le simulateur OMNeT++ n'est pas spécialisé pour les réseaux de capteurs sans fils, pour cela il existe plusieurs extensions, plateforme et simulateurs basés sur OMNET++ qui essaient d'introduire ce manque comme "Mobility Framework", "Mixim", "Castalia" ...etc. [1]

OMNeT++ est une application open source et sous licence GNU, basé sur le langage C++.

## 4.3 Castalia

Castalia est un simulateur de réseaux de capteurs sans fil basé sur OMNeT++, développé avec le C++, qui utilise un canal sans fil et un modèle de radio basé sur des données mesurées. D'après la figure 3.2, les principaux modules sont le nœud, Processus physiques et les canaux sans fil [2]. Les nœuds sont liés par les processus physiques qu'ils surveillent. En plus, les nœuds ne se connectent pas les uns aux autres, mais à travers le module de canal sans fil (wireless channel). Lorsqu'un nœud a un paquet d'envoyer cela va au canal sans fil qui décide alors quels nœuds doivent recevoir le paquet [2].



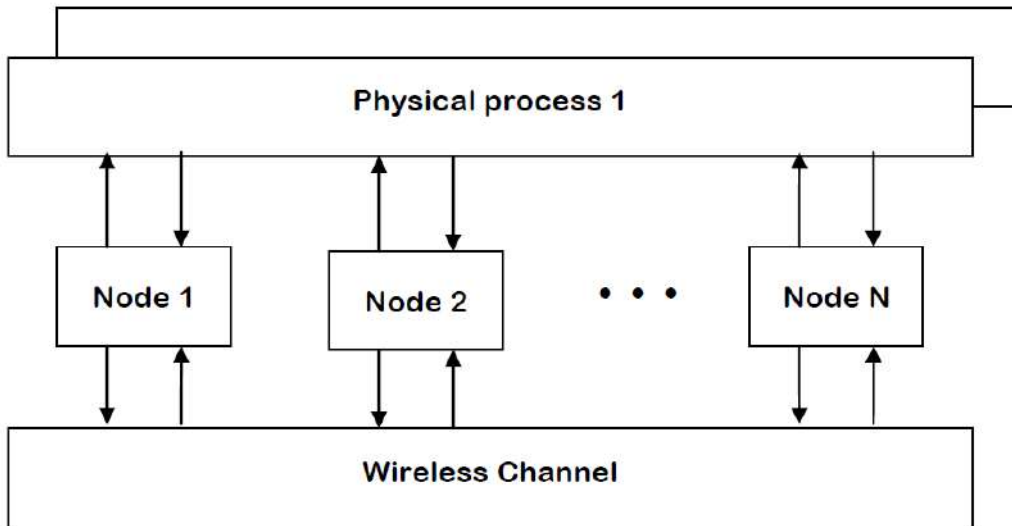


Figure 4.1 – Les connexions des modules sous Castalia [2]

### 4.3.1 La structure d'un nœud

Chaque nœud est composé de modules, Chaque module contient un dossier ".ned" qui définit le module lui-même. Les flèches pleines signifient le passage de message et les flèches en pointillés signifient une interface entre les modules et les appels de fonctions [2].

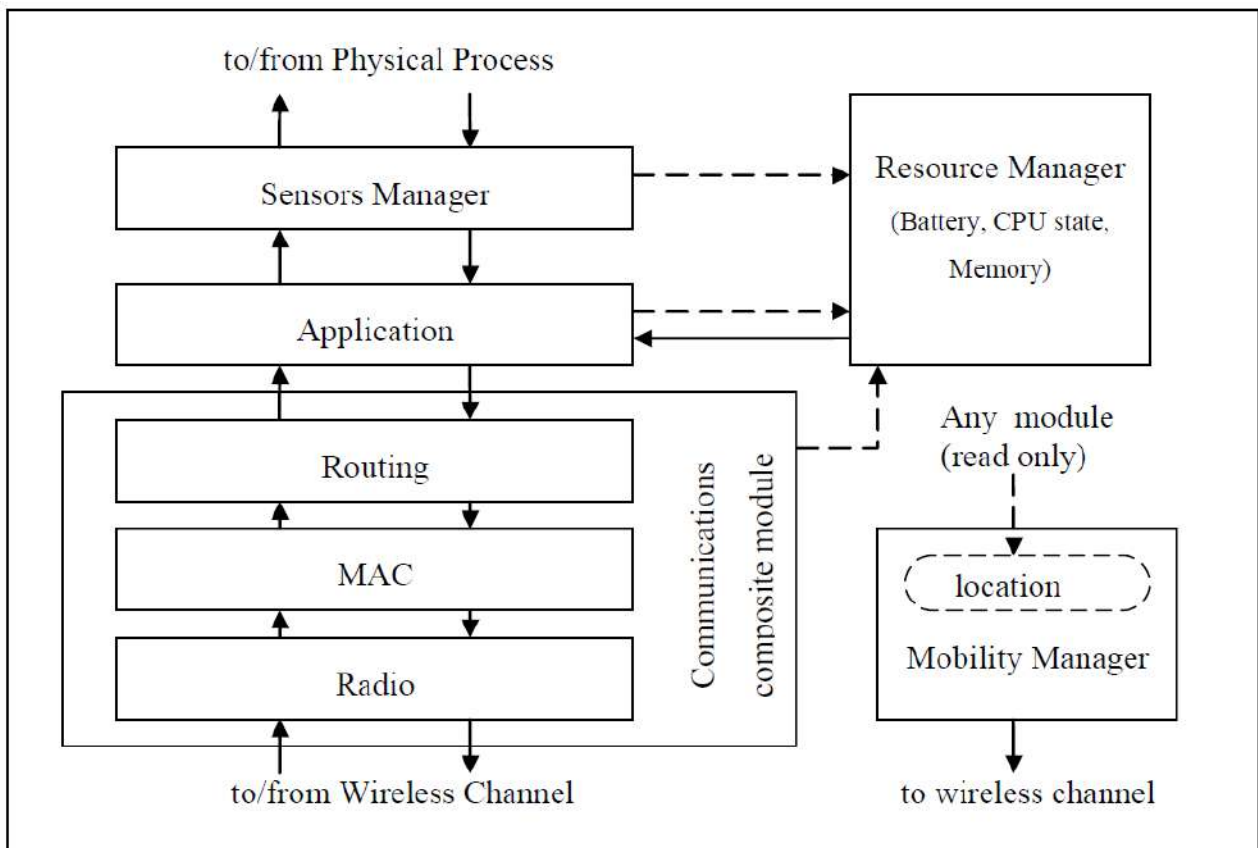


Figure 4.2 – Les principaux composants d'un nœud [2]

## 4.4 Implémentation de BOSS

Pour implémenter le protocole BOSS et dans le but d'améliorer les performances de réseau de capteurs sans fil, on va utiliser l'approche cross-layer (inter couche) qui exploite les fonctionnalités traditionnelles de la couche MAC dans les décisions de routage, afin de minimiser la consommation d'énergie. Le simulateur Castalia fournit une source bien structurée pour l'ajoute et le développement d'un nouveau protocole de communication. Les séquences d'action de l'émission et réception sont présentées ci-dessous :

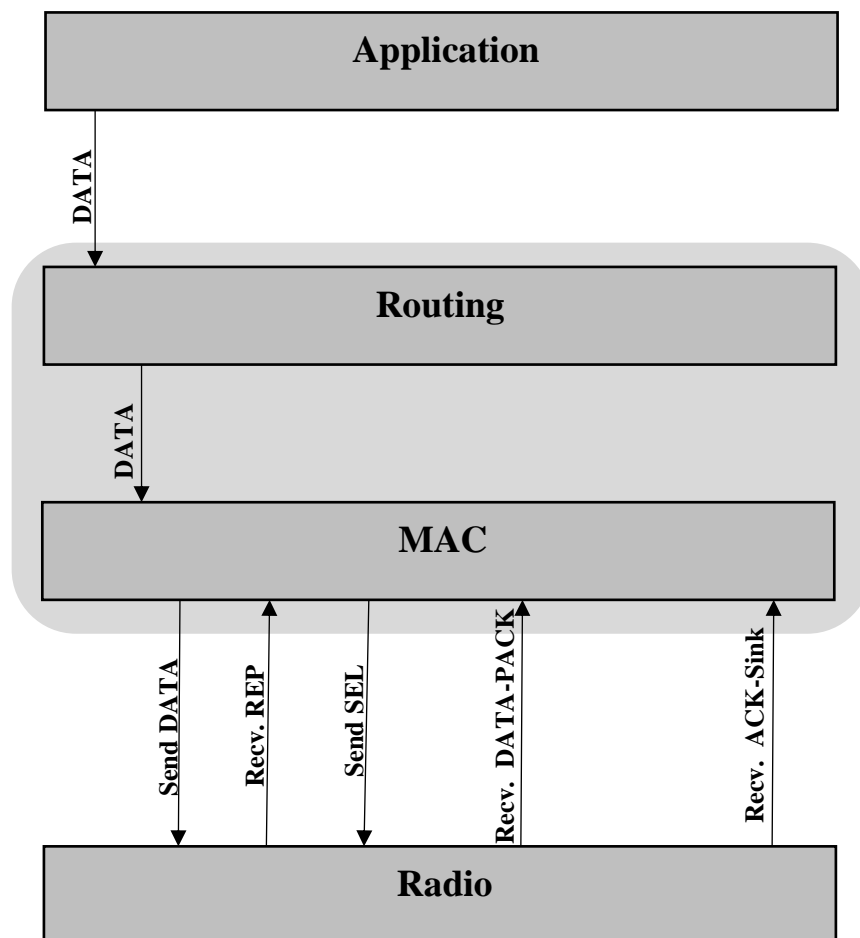


Figure 4.3 – protocole BOSS-Emission

Lorsqu'un paquet DATA est généré par la couche application, on doit vérifier si le sink est dans la zone de progression positive, si c'est le cas le paquet sera envoyé directement et un message ACK sera attendu de la part de sink. Si le sink est loin de la zone de transmission du nœud source, on doit diffuser le message DATA et attendre une réponse de ses voisins. A l'arrivée d'un message REP, le nœud source doit répondre par un message SEL au nœud relais qui va lancer à nouveau la transmission

du paquet DATA vers le sink. Ensuite, le nœud source écoute et attend la réémission de son paquet DATA sinon un nouveau processus d'envoi pour ce paquet DATA sera lancé.

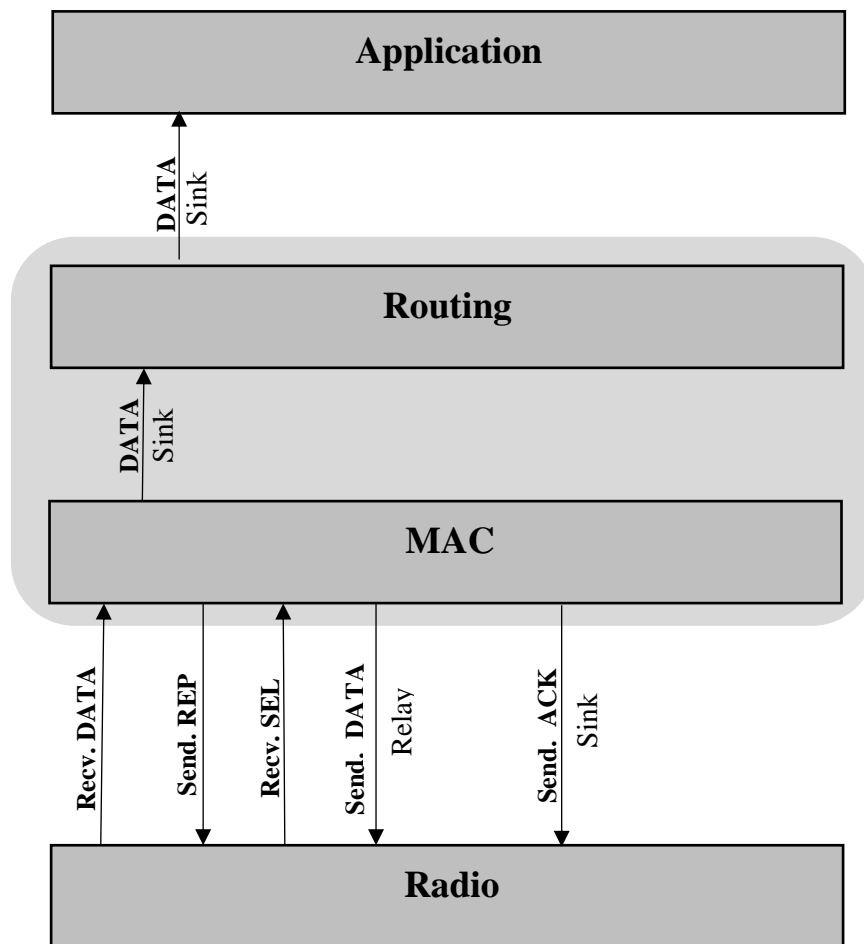


Figure 4.4 – protocole BOSS-Réception

#### 4.4.1 Aspects algorithmiques

Le protocole de routage BOSS, sera présenté par la classe nommée BossRoutingMAC, décrit comme suivant :

```
class BossRoutingMAC: public VirtualMac
{
private: //definition de tous les variables utilisés
    protected:
        void startup();
        void finish();
        void fromRadioLayer(cPacket *, double, double);
        void fromNetworkLayer(cPacket *, int);
        void timerFiredCallback(int);
        void handleCarrierSenseResultToSendDataRelay(int);
        void handleCarrierSenseResultToSendSEL(int);
        void handleCarrierSenseResultToSendDataSink(int);
        NodeLocation_type getNodeLocation();
        void finishSpecific();
        void initTx();
};
```

Chaque nœud sera sur un état connu tout le temps, ceci est déterminé par la variable NegotiationState, il prendra une valeur entière de :

```
enum NegotiationState {
    NEG_STATE_DEFAULT = 1,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_REP = 2,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_DATA = 3,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_ACK = 4,
    NEG_STATE_DELAYING_TO_SEND_REP = 5,
    NEG_STATE_SLEEPING_NAV = 6,
    NEG_STATE_SENSING_CARRIER = 7,
    NEG_STATE_ATTEMPT_TX = 8,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_SEL = 9,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_PACK = 10}
```

Un nœud peut recevoir quatre types de paquets provenant de la couche radio :

```
enum BossRoutingMacFrameTypeDef {
    BOSS_DATA = 1;
    BOSS_ACK = 2;
    BOSS_REP = 3;
    BOSS_SEL = 4}
```

La prochaine action dépendra du paquet reçu :

- À la réception d'un paquet de type BOSS\_DATA, chaque nœud calculera le temps de réponse par message REP en fonction de son emplacement (voir paragraphe 3.3).
- À la réception d'un paquet de type BOSS\_REP, le nœud source envoie un message SEL au relais et attendre la retransmission de son paquet DATA. A la fin de ce temps d'attente et s'il n'y a pas de retransmission du message DATA, il renvoie le message SELECTION jusqu'à 3 fois au maximum. Lorsque la 3<sup>ième</sup> re-sélection échoue tout le processus est répété. Le nœud source envoie à nouveau le paquet DATA. Ce processus peut être essayé jusqu'à 10 fois. Après cela, le paquet est abandonné.
- À la réception d'un paquet de type BOSS\_SEL, le nœud relais démarre la transmission du paquet DATA vers le sink.
- À la réception d'un paquet de type BOSS\_ACK par le sink, le nœud émetteur supprime le paquet DATA déjà envoyer.

#### 4.4.2 Environnement de la simulation

- **Paramètre matériel :** la simulation a été réalisée sur un ordinateur dont la configuration :

Processeur	Intel Core I7-CPU 2.7 GHz
Mémoire	8 GB
Disque dur	1 TO

Tableau 4.1 – Caractéristique du PC de la simulation

- **Paramètre logiciel :** la simulation a été réalisée dans un environnement logiciel suivant :
  - Système d'exploitation : WINDOWS 10
  - Le simulateur OMNet++ 4.6
  - Le simulateur Castalia 3.2
- **Paramètre de la simulation :**
  - a. Nous avons effectué des simulations avec 50 nœuds en état de mouvement répartis aléatoirement sur le terrain.
  - b. Le sink prend trois cas de mobilité :
    1. Sink fixe : pas de mouvement.
    2. Sink mouvement aléatoire.
    3. Sink mouvement linière régulier (un déplacement sur une ligne  $y=0$  et  $x=valeur$ ).

Paramètre	Valeur
Nombre de nœuds	50
Temps de Simulation	[50s, 100s, 150s, 200s, 250s, 300s, 350s, 400s]
Champ de simulation	[80m, 120m, 160m, 200m, 240m]
Rayon de transmission	50 m
Energie initial	17 joules
Modèle de Radio	CC2420
Tx Power	-5 dbm
Idle Listening Power	1.4 mw
Vitesse de mobilité du nœud	[1, 2, 3, 4, 5, 6]
Intervalle créer paquet	5 s
Déploiement du nœud	Aléatoire
Nombre de région	[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
Nombre max de saut	Indéterminé
Nombre total des paquets générés	Durée*50*5

Tableau 4.2 – les paramètres de la simulation

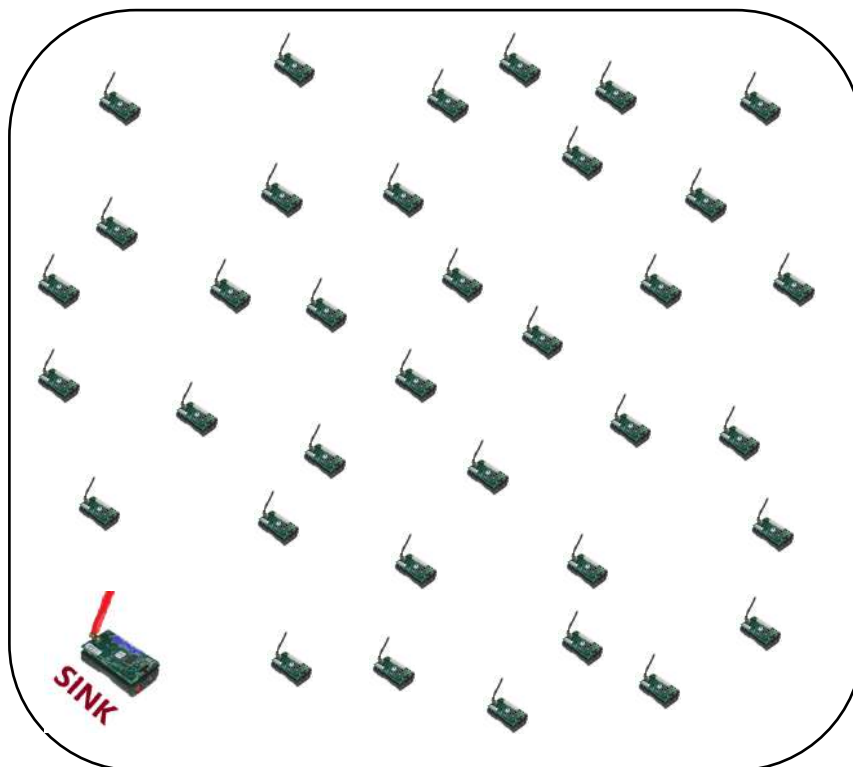


Figure 4.5 – Déploiement aléatoire des nœuds

### 4.4.3 Métriques de la simulation

Les métriques utilisées pour l'analyse des performances du protocole sont :

- Les paquets dupliqués : le nombre de paquets de données dupliquées reçus par le sink.
- Consommation d'énergie : l'énergie initiale est fixée à 17 joules. Il est important de garder les capteurs en vie aussi longtemps que possible. Cela permet de surveiller la durée de vie du réseau.
- Les paquets délivrés : le nombre de paquets de données livrés aux sink
- Délai moyen de bout en bout : le délai pour un paquet est le temps pris pour atteindre le sink. Et

le délai moyen est :  $Délai\ moyen = \frac{somme\ des\ délais}{nombre\ de\ paquet\ délivré}$

### 4.5 Etude de performances du BOSS selon la mobilité du sink

Nous avons effectué la simulation du protocole BOSS selon les quatre métriques utilisées par rapport aux trois types de mouvements du sink :

On doit faire varier les paramètres de simulation et voir le comportement du protocole BOSS selon le mouvement du sink.

### 4.5.1 Les paquets délivrés

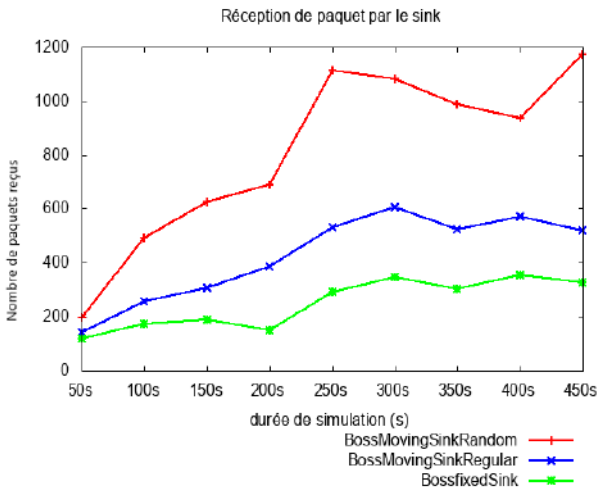


Figure 4.6 – Paquet délivré-Durée de simulation

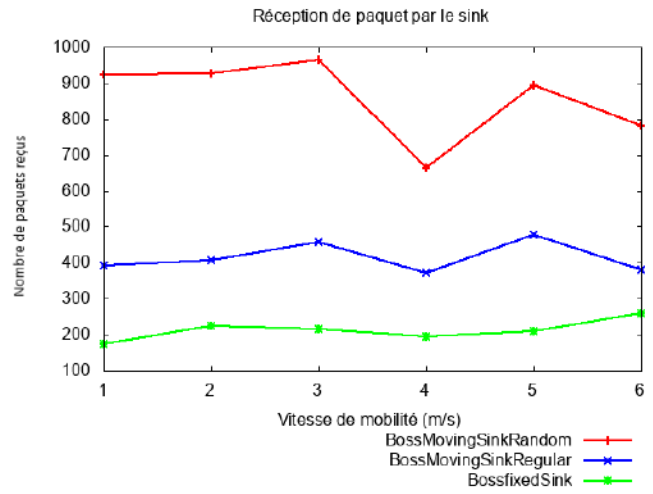


Figure 4.7 – Paquet délivré-Vitesse de mobilité

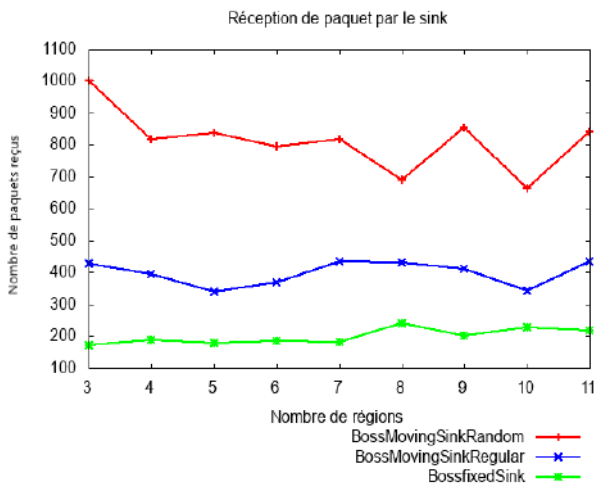


Figure 4.8 – Paquet délivré-Nombre de régions

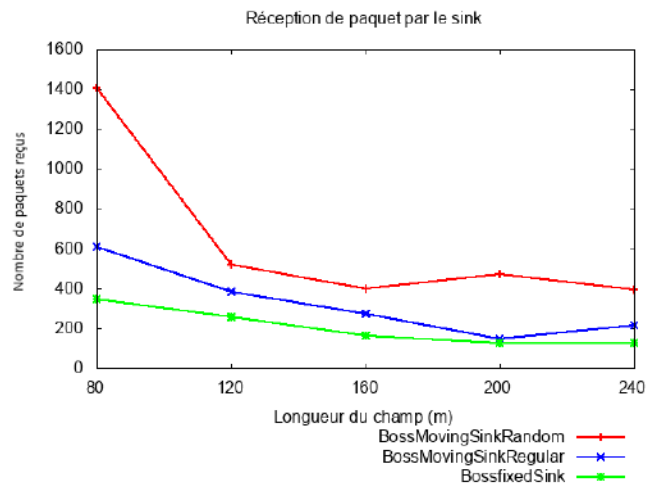


Figure 4.9 – Paquet délivré-Longueur de champ

En termes de paquet délivré, il est remarquable que BOSS donne de meilleurs résultats lorsque le sink est en mouvement aléatoire que régulier. D'autre part, les paquets délivrés ont diminué de manière remarquable lorsque le champ est étendu, comme indiqué sur la figure 4.9.



### 4.5.2 Les paquets dupliqués

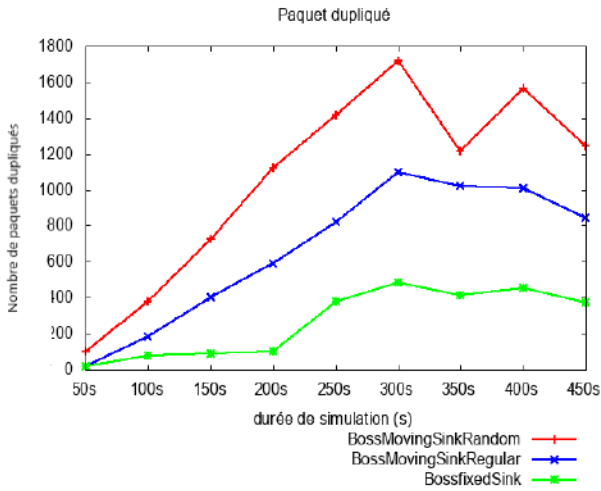


Figure 4.10 – Paquet délivré-Durée de simulation

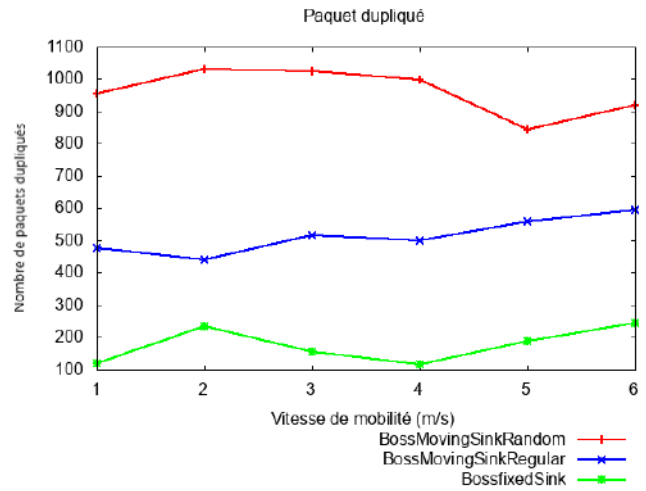


Figure 4.11 – Paquet délivré-Vitesse de mobilité

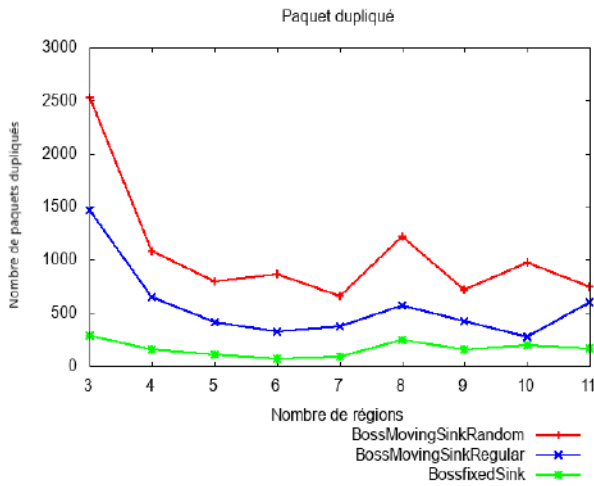


Figure 4.12 – Paquet délivré-Nombre de régions

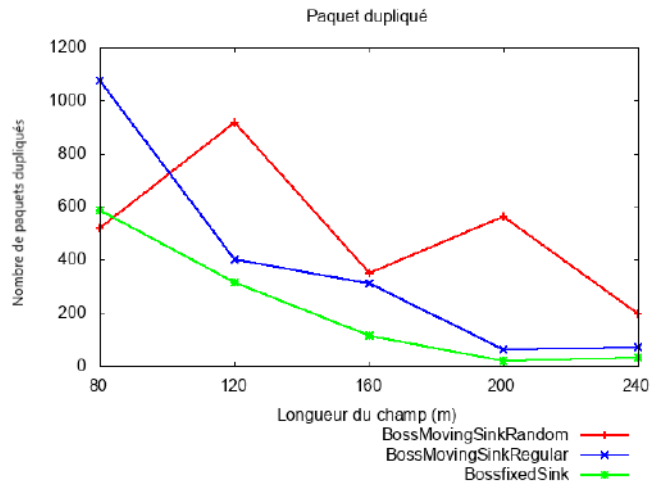


Figure 4.13 – Paquet délivré-Longueur de champ

En termes de paquet dupliqué, le protocole BOSS donne de meilleur résultat en sink fixe plutôt qu'un sink en mouvement. D'autre part, les paquets dupliqués ont diminué de manière significative lorsque le champ est étendu, comme indiqué sur la figure 4.13. De plus, cela s'applique aussi au nombre de paquets dupliqués reçus par rapport le nombre de régions de la figure 4.12

### 4.5.3 Consommation d'énergie

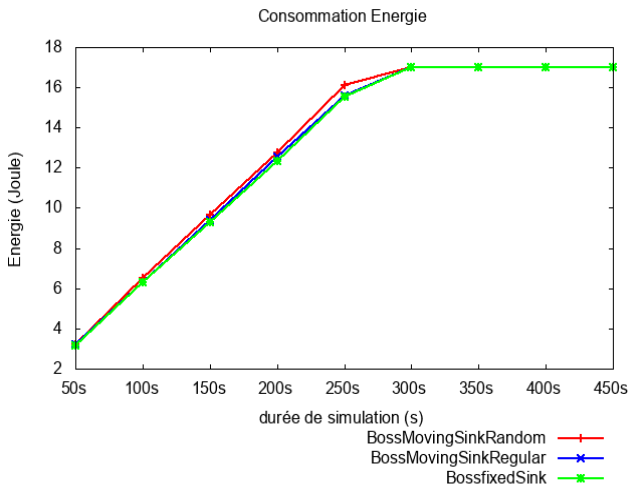


Figure 4.14 – Energie-  
Durée de simulation

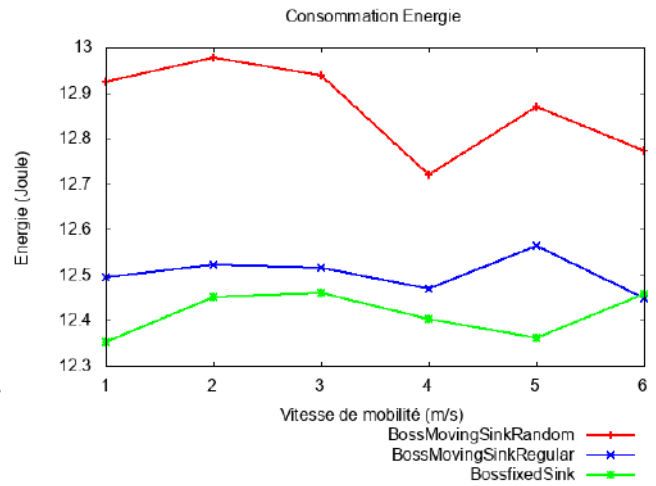


Figure 4.15 – Energie-  
Vitesse de mobilité

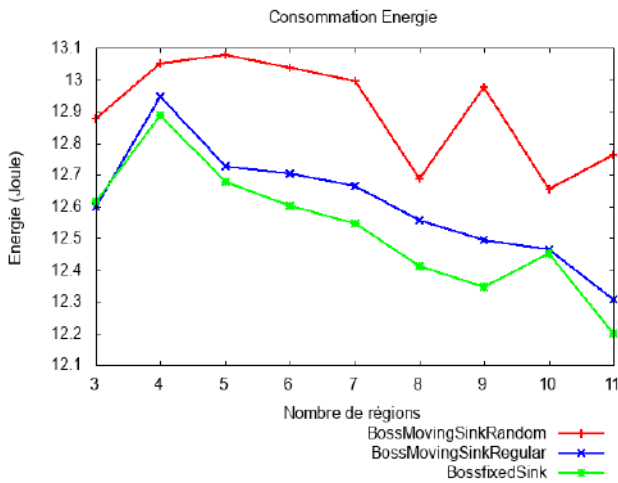


Figure 4.16 – Energie-  
Nombre de régions

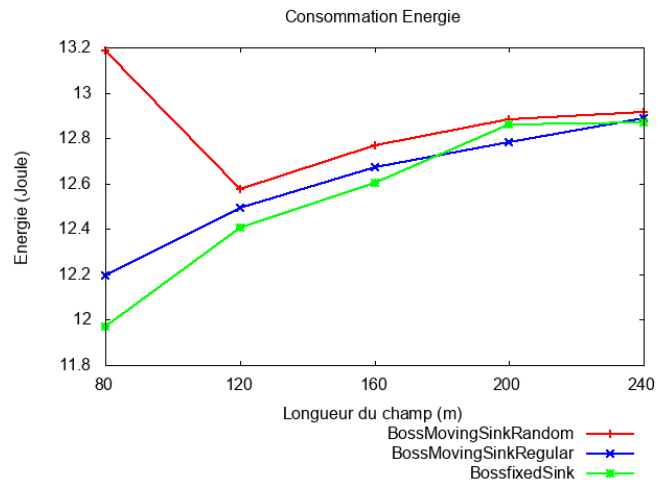


Figure 4.17 – Energie-  
Longueur de champ

En termes d'énergie, BOSS donne de meilleurs résultats lorsque le sink est fixe plutôt qu'un sink en mouvement. En plus, l'augmentation du nombre de région de transmission implique une diminution de la consommation d'énergie pour le protocole BOSS selon les trois types de mouvements du sink. Donc, le nombre de régions supérieur ou égal à 8 donne des bons résultats pour la consommation d'énergie. D'autre part, la figure 4.14 montre qu'une augmentation de la durée de simulation donne une consommation d'énergie presque identique pour les trois types de mouvements de sink.

### 4.5.4 Délai moyen de bout en bout

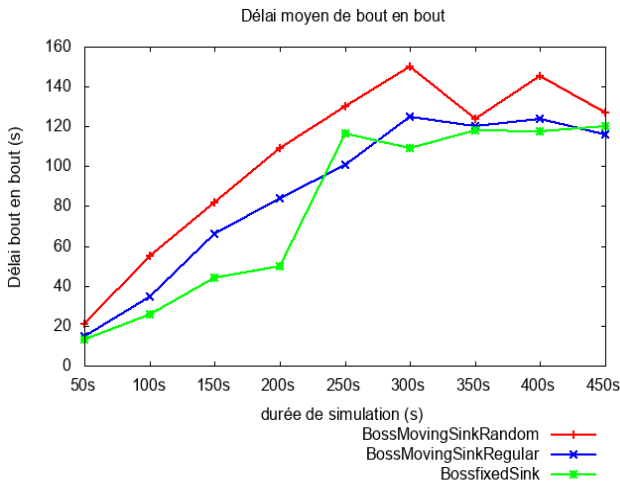


Figure 4.18 – Délai moyen-  
Durée de simulation

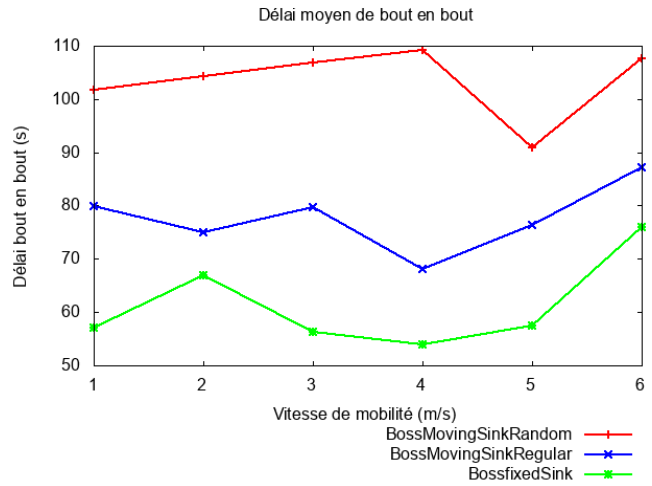


Figure 4.19 – Délai moyen -  
Vitesse de mobilité

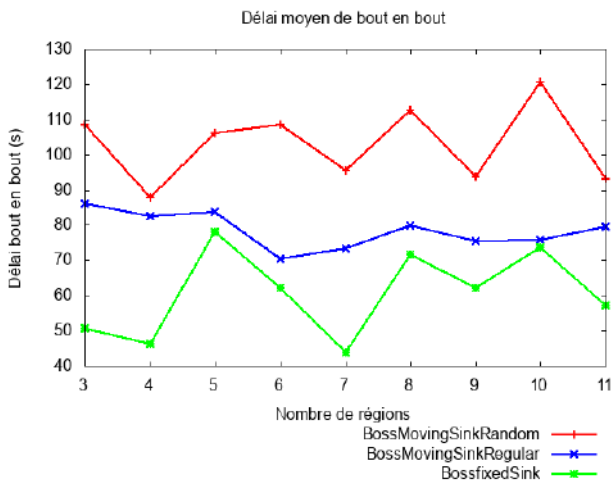


Figure 4.20 – Délai moyen-  
Nombre de régions

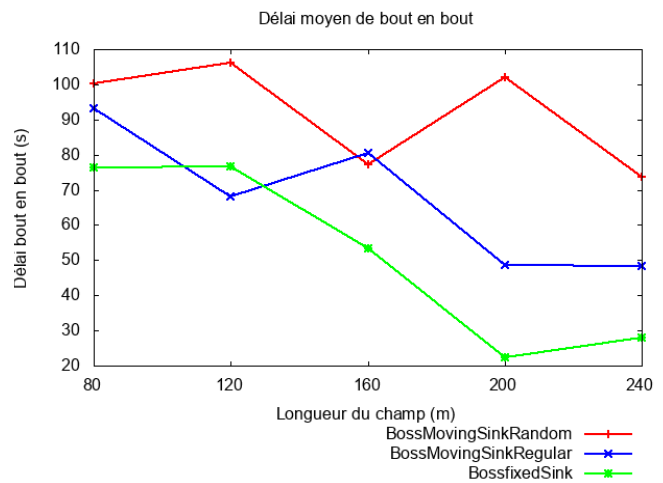


Figure 4.21 – Délai moyen-  
Longueur de champ

En termes de délai moyen, BOSS donne des meilleurs résultats lorsque le sink est fixe plutôt qu'un sink en mouvement. D'autre part, le délai moyen est diminué de manière significative lorsque le champ est étendu, comme indiqué la figure 4.21.

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté le protocole BOSS en utilisant Castalia et OMNeT++ avec le langage de programmation C++. Nous avons utilisé l'approche cross-layer qui permet de fusionner les deux couches réseau et MAC en une seule couche (MAC/Réseau), afin de minimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau. Puis, nous avons étudié les performances du protocole BOSS selon la mobilité du sink pour les différents paramètres de simulation et les résultats des analyses ont montré que :

- L'utilisation d'un sink en mouvement aléatoire donne des meilleurs résultats pour les paquets délivrés.
- L'utilisation d'un sink fixe garantit des bons résultats pour la consommation d'énergie, délai moyen et les paquets dupliqués.
- Lorsque le nombre de région augmenté implique la consommation d'énergie et les paquets dupliqués seront diminués.
- Lorsque le champ est étendu implique le délai moyen, les paquets dupliqués et les paquets délivrés seront diminués.

## **Chapitre 5 : Comparaison BOSS avec Geraf**

## 5.1 Introduction

Nous avons effectué des simulations entre le protocole BOSS et le protocole Geraf (Geographic Random Forwarding routing protocol), qui est de la même famille des protocoles de routage géographique sans balise. Cette simulation consiste à faire une comparaison entre les deux protocoles selon les trois cas de mobilité de Sink, en faisant varier quatre paramètres de simulation (la durée de simulation, la vitesse de mobilité, le nombre de région et la longueur du champ), pour avoir quatre diagrammes sur les métriques utilisés (les paquets dupliqués, les paquets délivrés, la consommation d'énergie et le délai moyen de bout en bout).

## 5.2 Cas sink fixe

### 5.2.1 Les paquets dupliqués

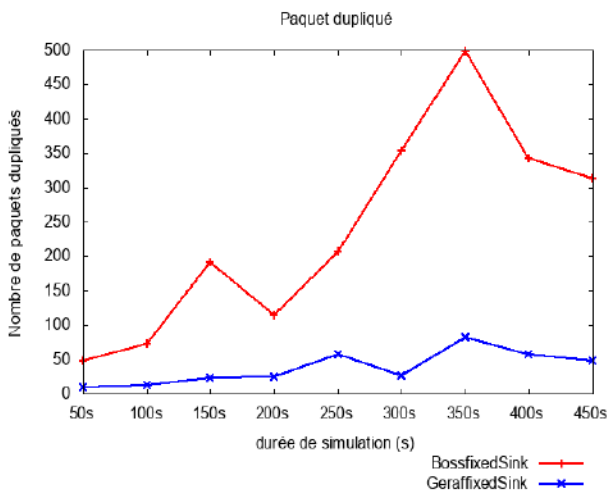


Figure 5.1 – Paquet dupliqué-  
Durée de simulation-sink fixe

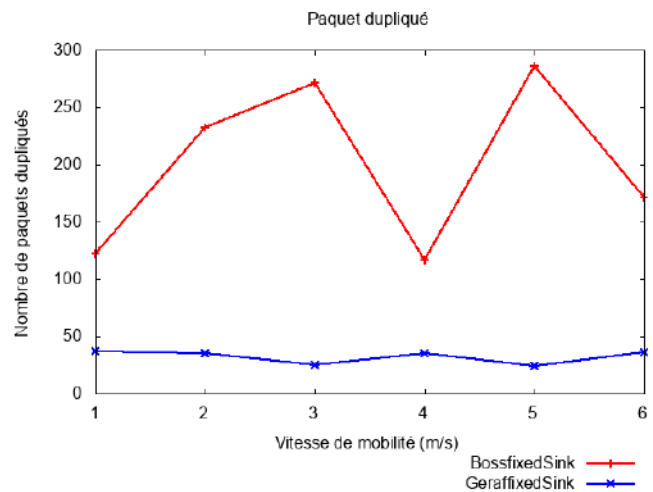


Figure 5.2 – Paquet dupliqué-  
Vitesse de mobilité-sink fixe

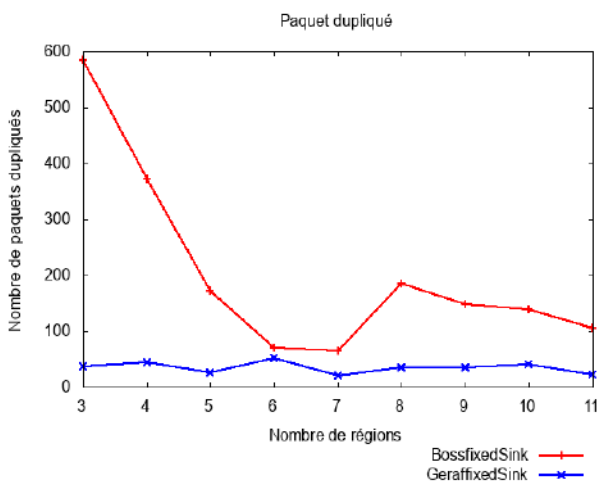


Figure 5.3 – Paquet dupliqué-  
Nombre de régions-sink fixe

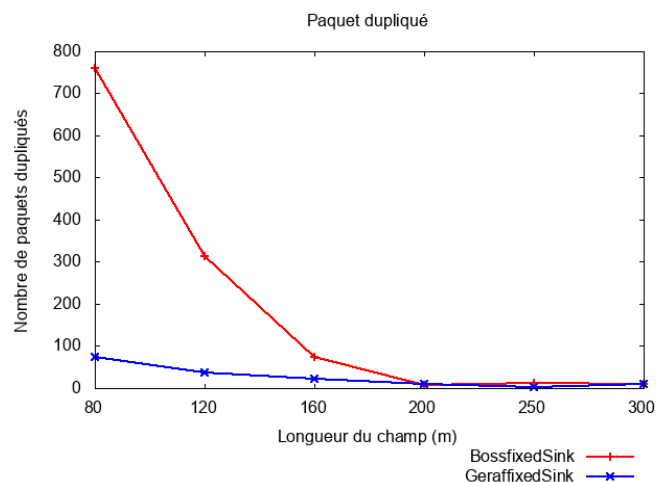


Figure 5.4 – Paquet dupliqué-  
Longueur de champ-sink fixe

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique paquet dupliqué, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour le protocole BOSS :

- Les paquets dupliqués ont diminué pour : une augmentation du nombre de régions, de la longueur du champ et pour la vitesse de mobilité égal 1 ou 4 (m/s).
- Les paquets dupliqués ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation et vitesse de mobilité.

Pour le protocole Geraf :

- Les paquets dupliqués ont une légère différence pour : une augmentation du nombre de régions et vitesse de mobilité.
- Les paquets dupliqués ont une légère diminution pour : une augmentation du champ.
- Les paquets dupliqués ont une légère augmentation pour : une augmentation de la durée de simulation.

### 5.2.2 Consommation d'énergie

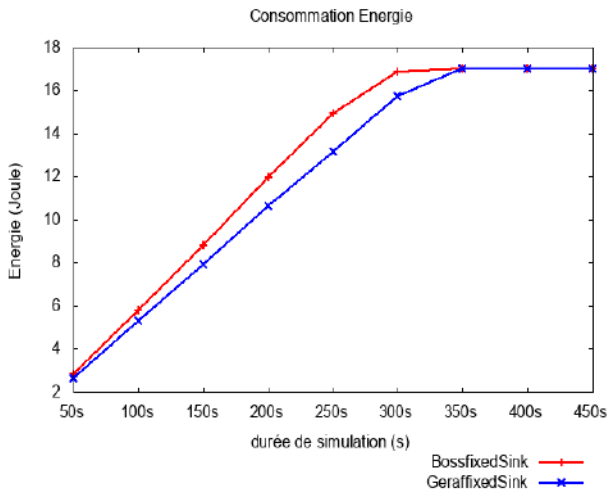


Figure 5.5 – Energie-Durée de simulation-sink fixe

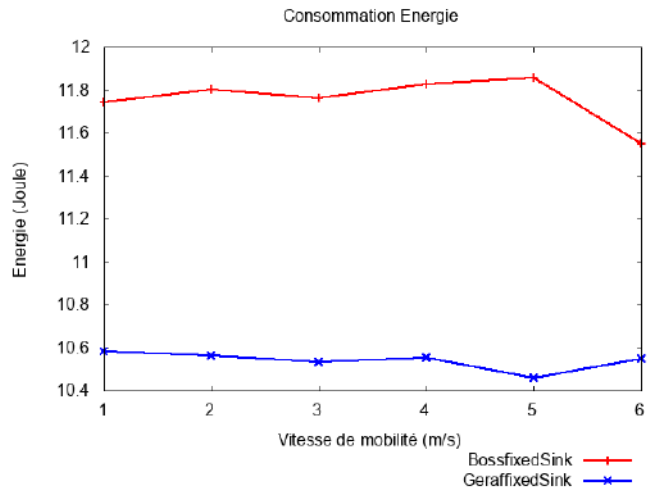


Figure 5.6 – Energie-Vitesse de mobilité-sink fixe

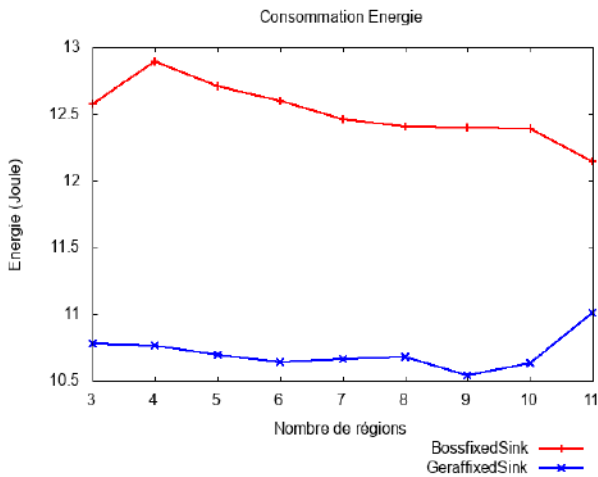


Figure 5.7 – Energie-Nombre de régions-sink fixe

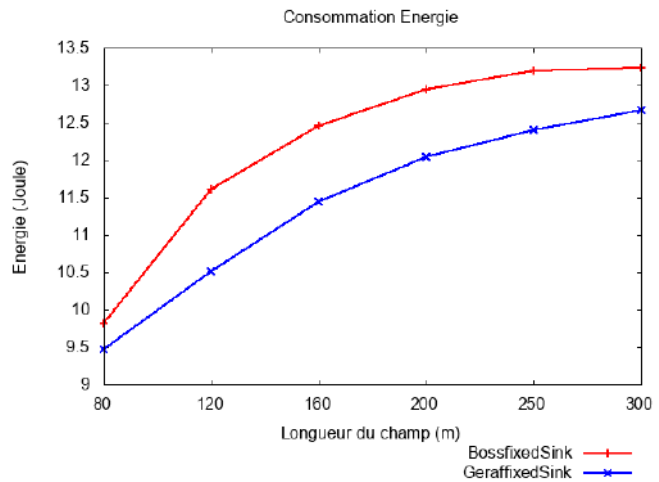


Figure 5.8 – Energie-Longueur de champ-sink fixe

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique énergie consommée, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles :

- Une augmentation de la durée de simulation et de la longueur du champ donne une augmentation de consommation d'énergie. Geraf consomme d'énergie moins que BOSS dans les deux cas.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité et du nombre de régions donne une légère différence de consommation d'énergie. Geraf consomme d'énergie moins que BOSS dans les deux cas.



### 5.2.3 Les paquets délivrés

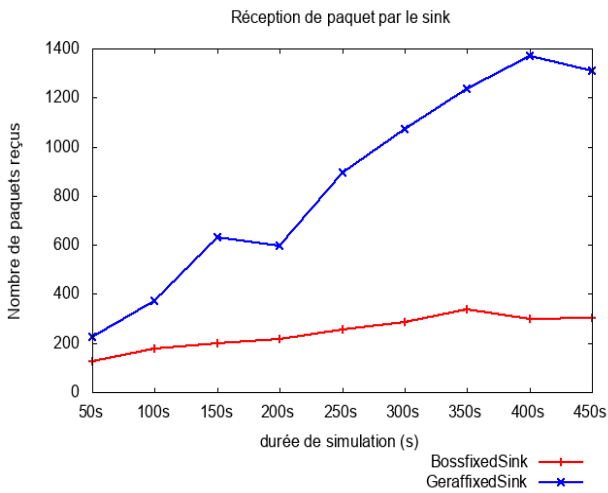


Figure 5.9 – Paquet délivré-Durée de simulation-sink fixe

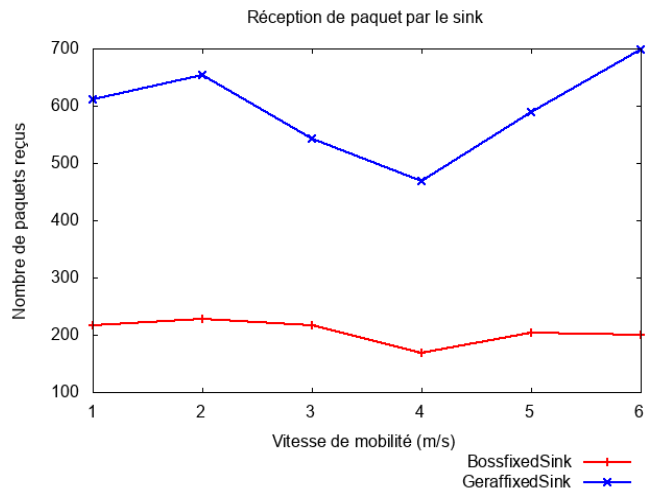


Figure 5.10 – Paquet délivré-Vitesse de mobilité-sink fixe

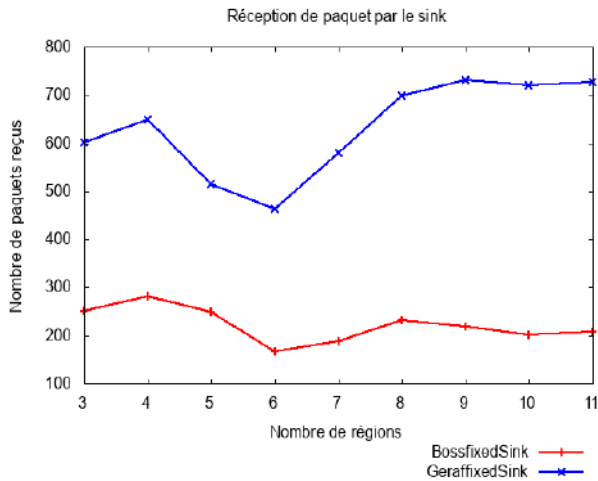


Figure 5.11 – Paquet délivré-Nombre de régions-sink fixe

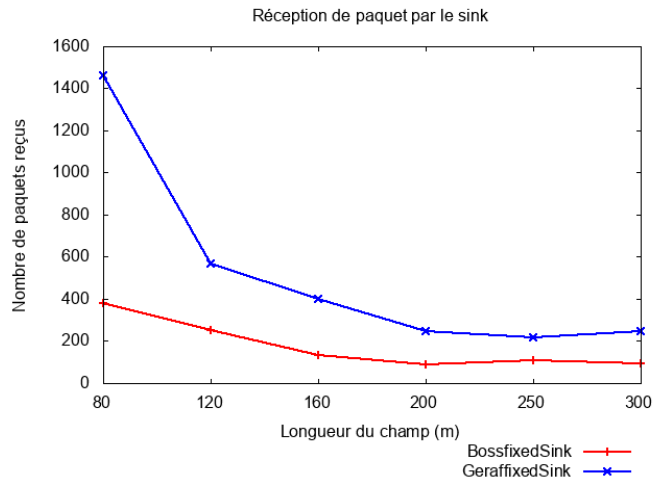


Figure 5.12 – Paquet délivré-Longueur de champ-sink fixe

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique paquet délivré, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles Geraf et BOSS :

- Les paquets délivrés ont diminué pour : une augmentation de la longueur du champ.
- Les paquets délivrés ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité et du nombre de régions donne une légère différence de paquet délivré.

### 5.2.4 Délai moyen de bout en bout

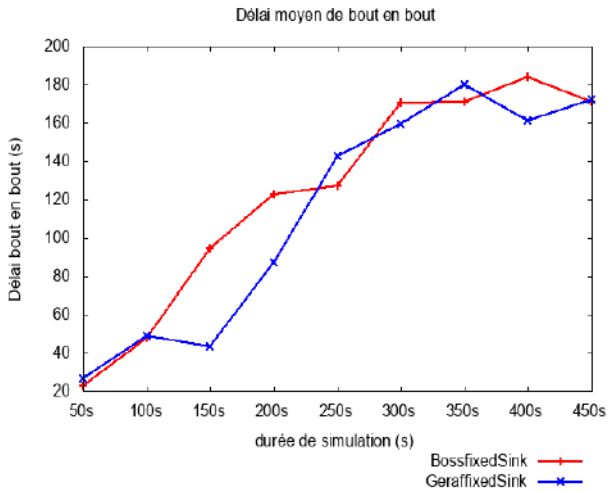


Figure 5.13 – Délai moyen-Durée de simulation-sink fixe

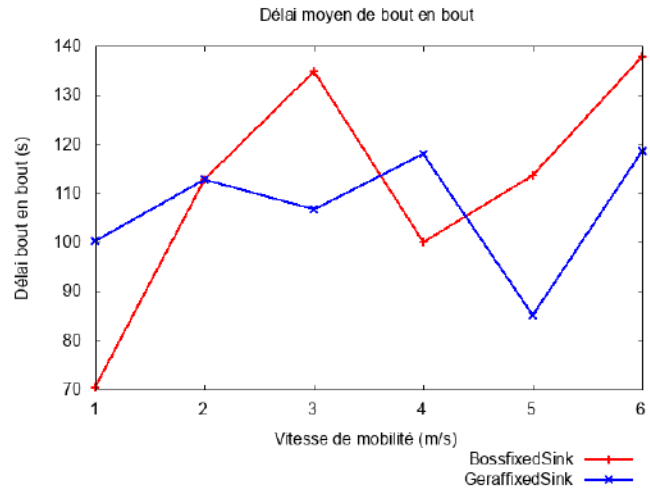


Figure 5.14 – Délai moyen-Vitesse de mobilité-sink fixe

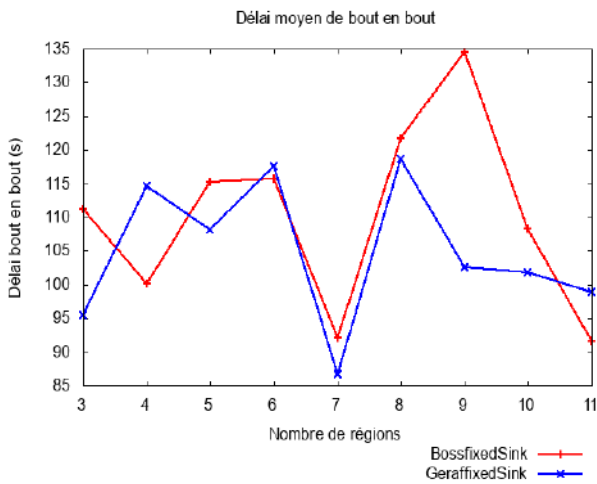


Figure 5.15 – Délai moyen-Nombre de régions-sink fixe

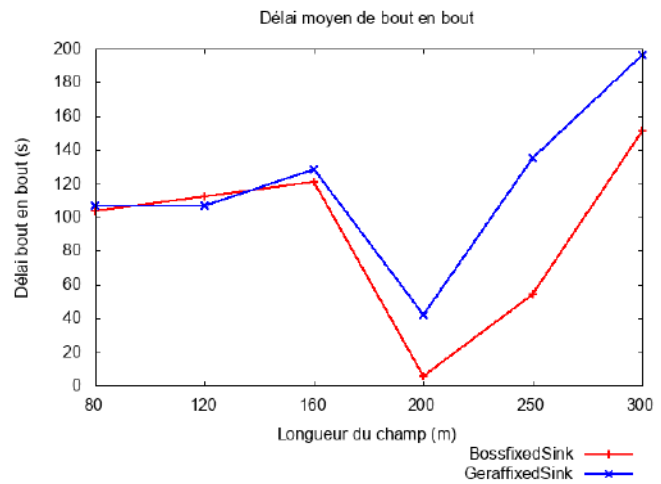


Figure 5.16 – Délai moyen-Longueur de champ-sink fixe

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique délai moyen, Il y a une très grande ressemblance entre les deux protocoles Geraf et BOSS.

Pour le nombre de régions égal à 7, donne un résultat minimum pour le délai moyen.

### 5.3 Cas sink en mouvement aléatoire

#### 5.3.1 Les paquets dupliqués

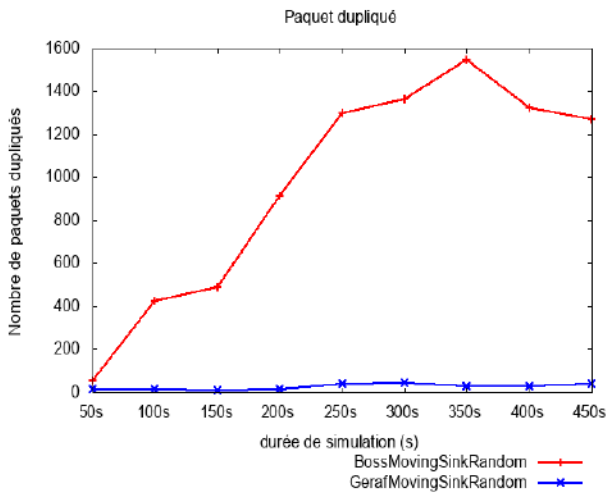


Figure 5.17 – Paquet dupliqué-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

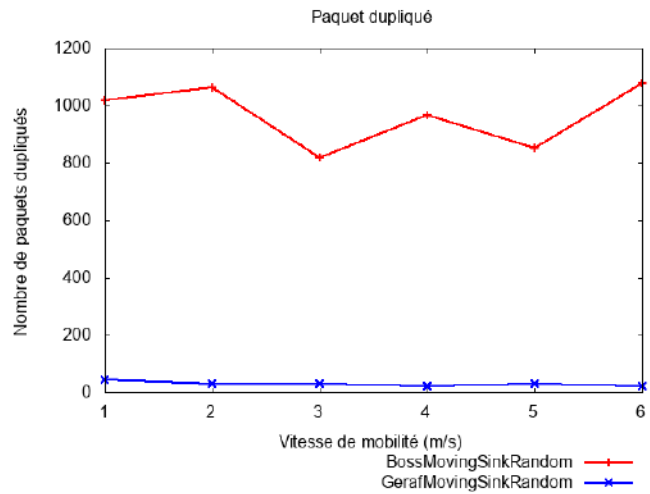


Figure 5.18 – Paquet dupliqué -Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

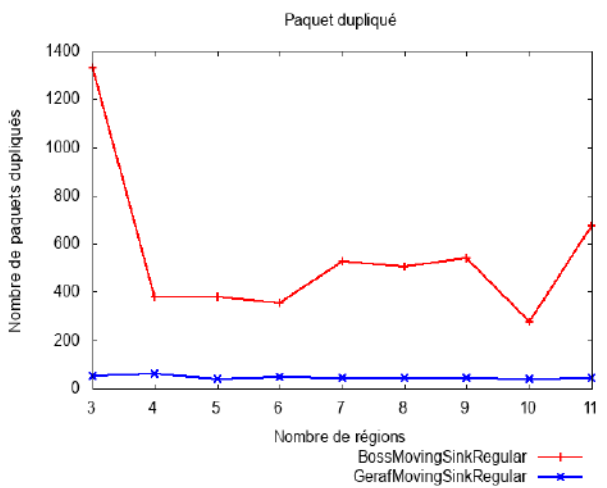


Figure 5.19 – Paquet dupliqué -Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

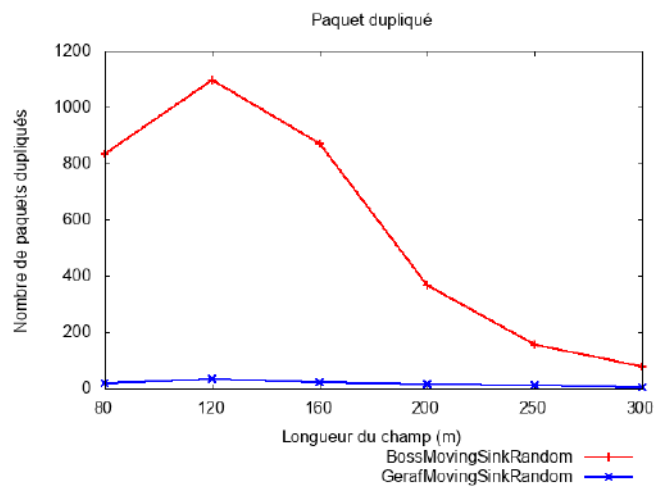


Figure 5.20 – Paquet dupliqué -Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique paquet dupliqué, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour le protocole BOSS :

- Les paquets dupliqués ont diminué pour : une augmentation du nombre de régions et de la longueur du champ.
- Les paquets dupliqués ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation.
- Pour une augmentation de la vitesse de mobilité donne une légère différence.

Pour le protocole Geraf : donne des meilleurs résultats pour les paquets dupliqués pour tous les cas.

### 5.3.2 Consommation d'énergie

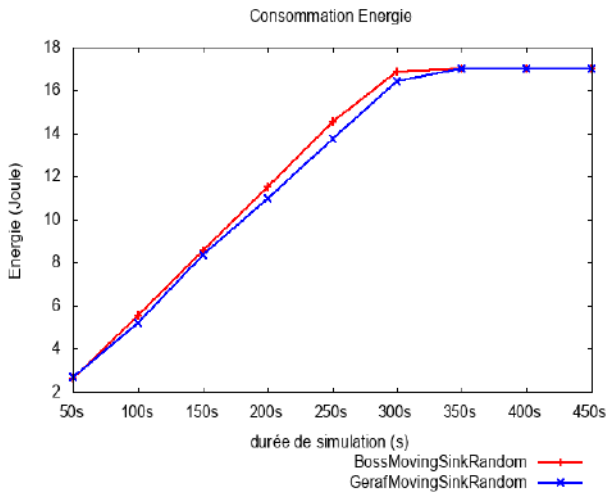


Figure 5.21 – Energie-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

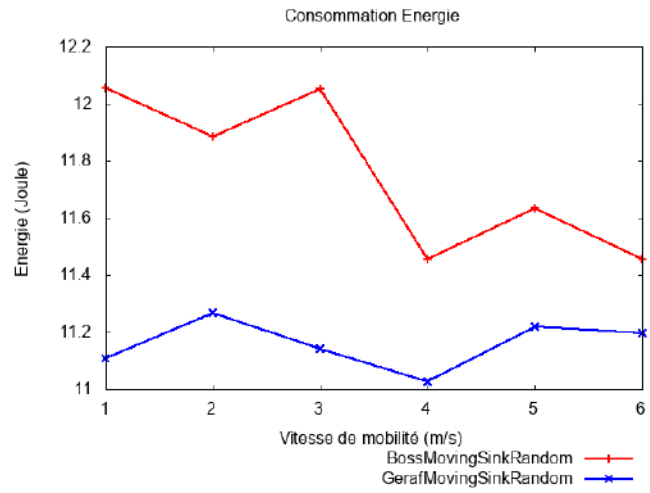


Figure 5.22 – Energie-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

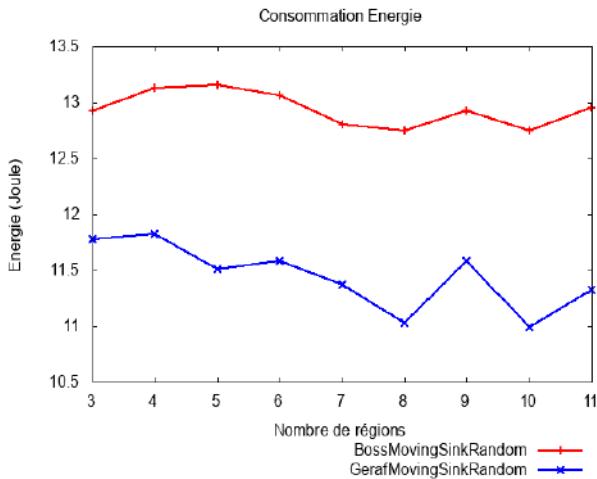


Figure 5.23 – Energie-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

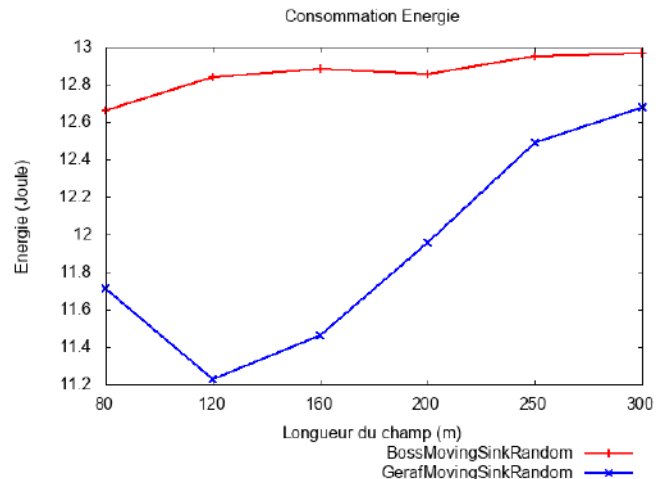


Figure 5.24 – Energie-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique énergie consommée, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles:

- Une augmentation de la durée de simulation et de la longueur du champ donne une augmentation de consommation d'énergie.
- Une augmentation du nombre de régions donne une légère différence de consommation d'énergie. la consommation d'énergie pour Geraf est moins que BOSS dans ce cas.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité donne une diminution de consommation d'énergie pour le protocole BOSS, alors que le protocole Geraf donne une légère différence. Le protocole Geraf consomme moins d'énergie que le protocole BOSS.

### 5.3.3 Les paquets délivrés

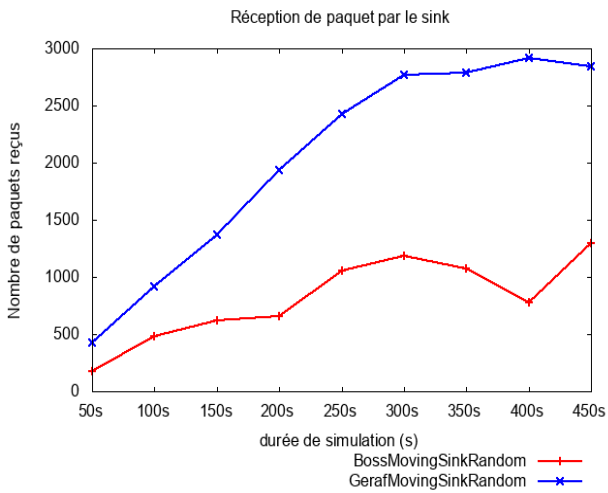


Figure 5.25 – Paquet délivré-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

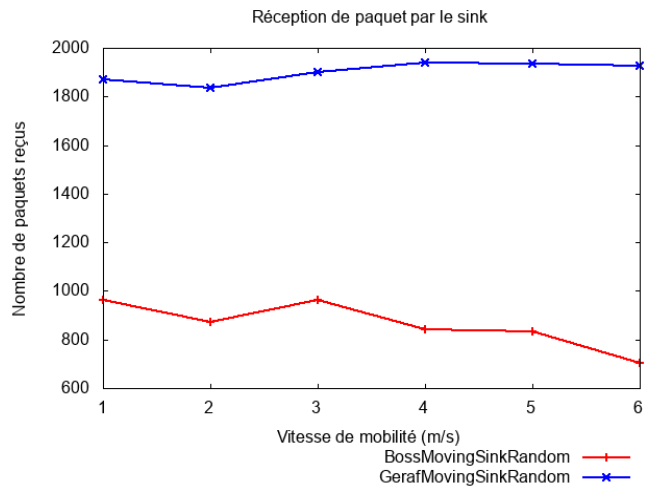


Figure 5.26 – Paquet délivré-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

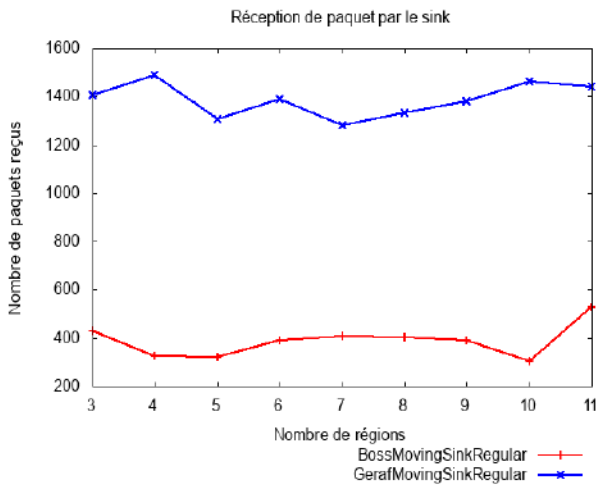


Figure 5.27 – Paquet délivré-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

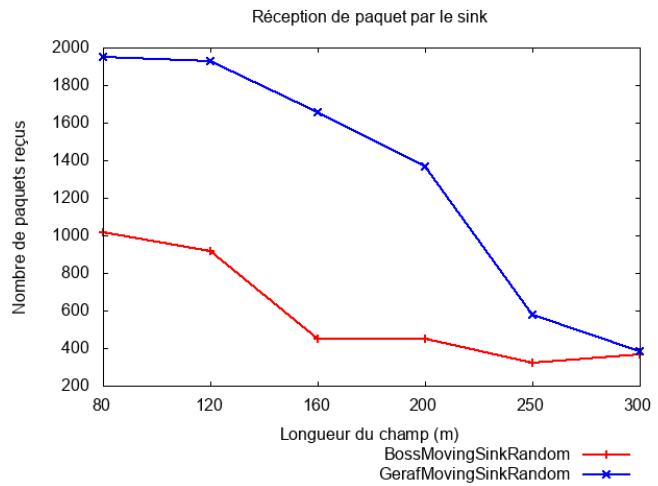


Figure 5.28 – Paquet délivré-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique paquet délivré, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles Geraf et BOSS :

- Les paquets délivrés ont diminué pour : une augmentation de la longueur du champ.
- Les paquets délivrés ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité et du nombre de régions donne une légère différence de paquet délivré.

### 5.3.4 Délai moyen de bout en bout

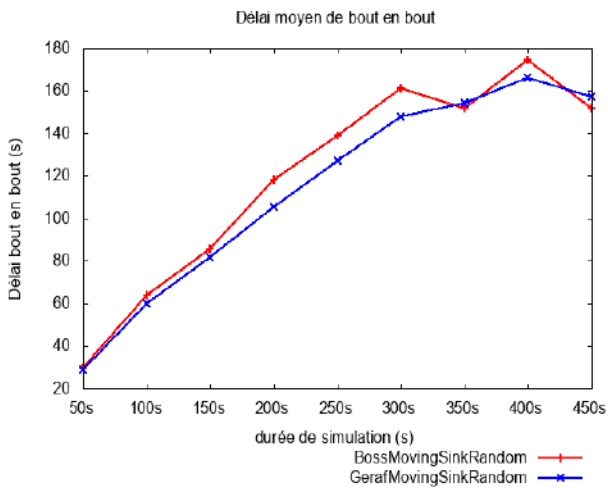


Figure 5.29 – Délai moyen-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

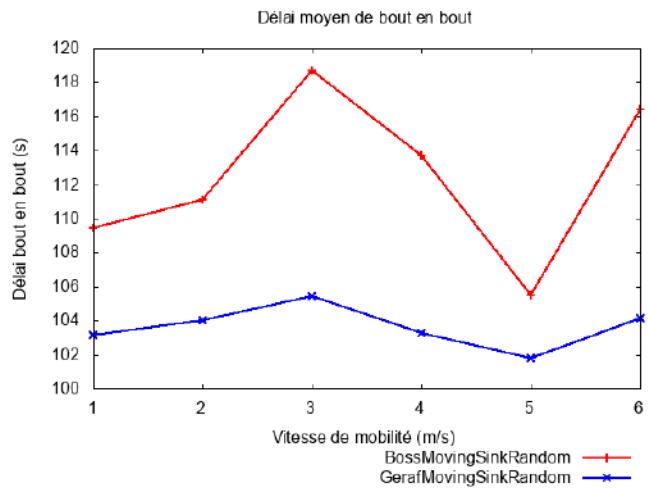


Figure 5.30 – Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

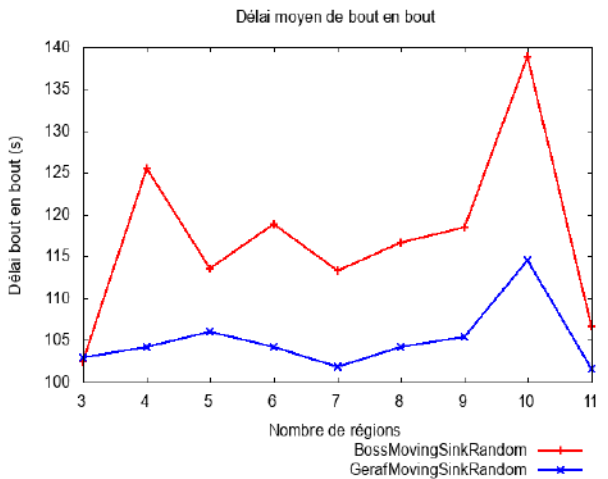


Figure 5.31 – Délai moyen-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

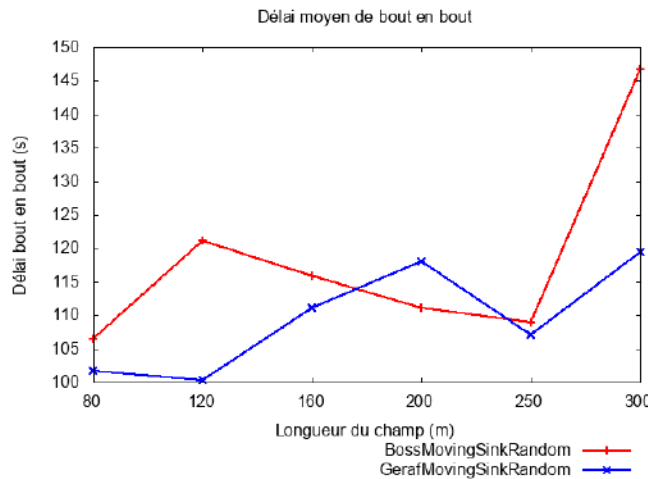


Figure 5.32 – Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique délai moyen, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Une augmentation de la durée de simulation donne une augmentation du délai moyen pour les deux protocoles. Il y a une ressemblance entre les deux.

Une augmentation de la longueur du champ, le nombre de région et la vitesse de mobilité donne une légère différence dans chaque protocole. Le protocole Geraf donne des meilleurs résultats que le protocole BOSS.

## 5.4 Cas sink en mouvement régulier

### 5.4.1 Les paquets dupliqués

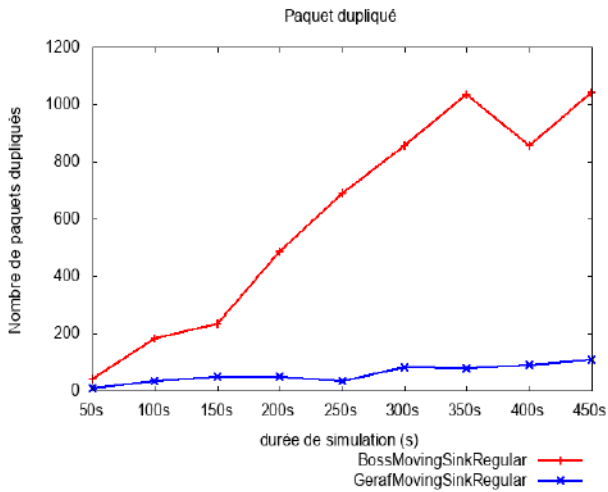


Figure 5.33 – Paquet dupliqué -Durée de simulation-Mouv. régulier sink

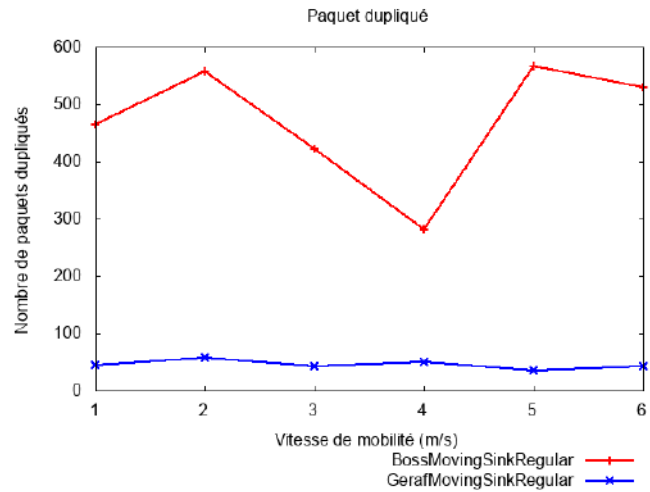


Figure 5.34 – Paquet dupliqué -Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

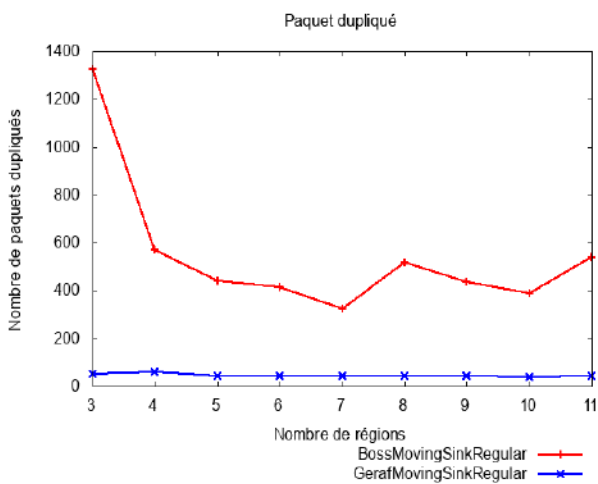


Figure 5.35 – Paquet dupliqué -Nombre de régions-Mouv. régulier sink

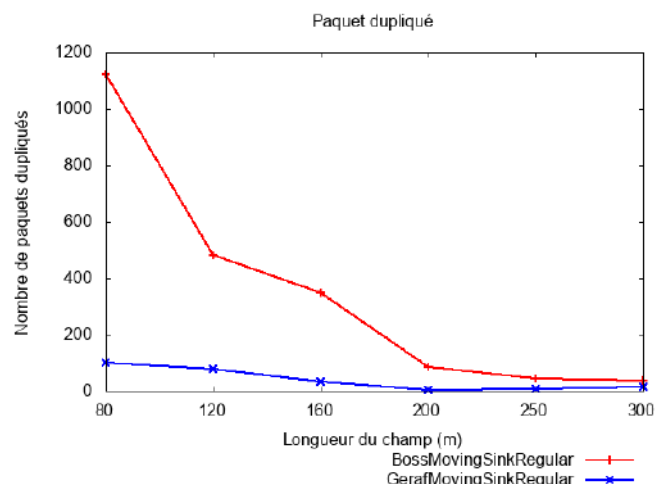


Figure 5.36 – Paquet dupliqué -Longueur de champ-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique paquet dupliqué, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour le protocole BOSS :

- Les paquets dupliqués ont diminué pour : une augmentation du nombre de régions et de la longueur du champ.
- Les paquets dupliqués ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation.
- Pour une augmentation de la vitesse de mobilité donne une légère différence.

Pour le protocole Geraf : donne des meilleurs résultats pour les paquets dupliqués pour tous les cas.

### 5.4.2 Consommation d'énergie

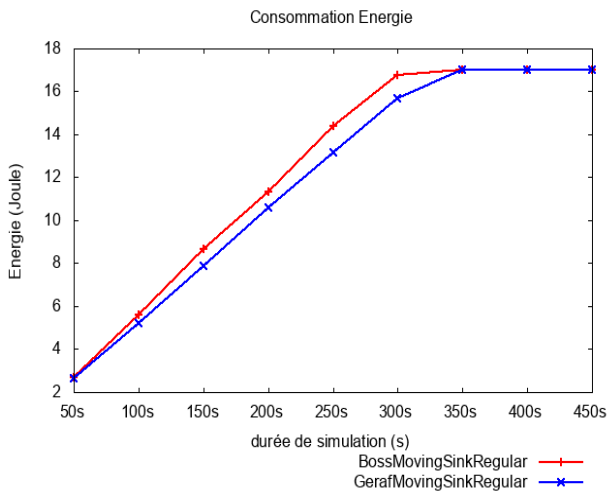


Figure 5.37 – Energie -Durée de simulation-Mouv. régulier sink

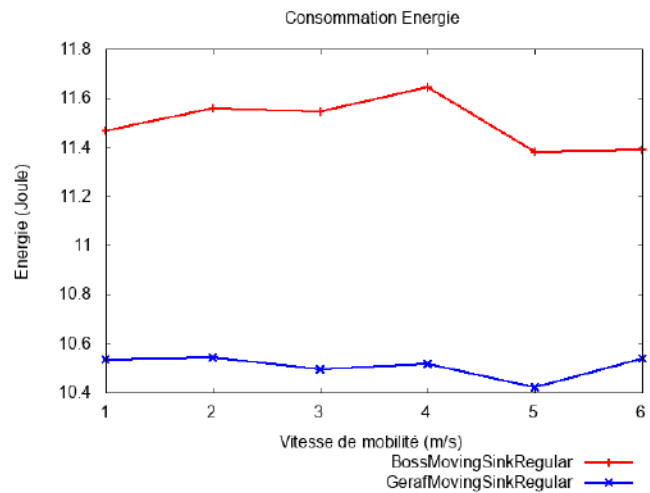


Figure 5.38 – Energie -Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

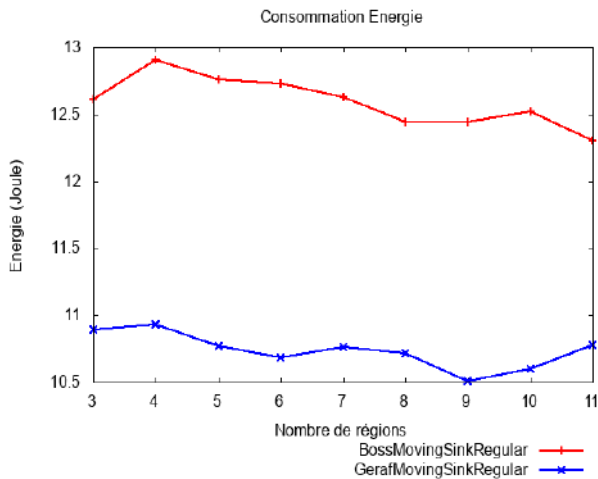


Figure 5.39 – Energie -Nombre de régions-Mouv. régulier sink

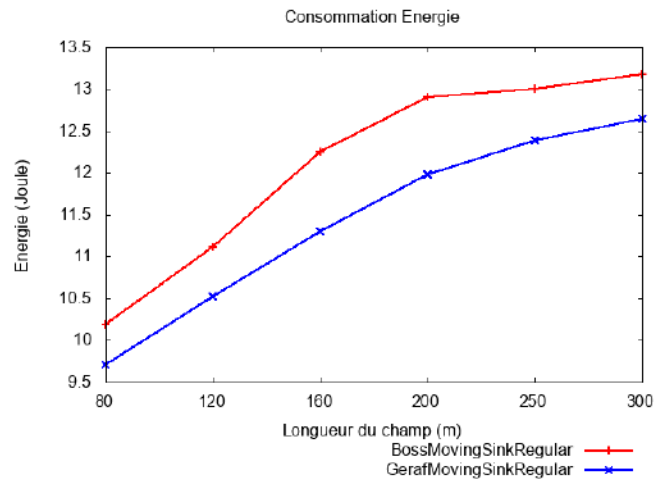


Figure 5.40 – Energie -Longueur de champ-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique énergie consommée, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles :

- Une augmentation de la durée de simulation et de la longueur du champ donne une augmentation de consommation d'énergie.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité donne une légère différence pour la consommation d'énergie.
- Une augmentation du nombre de régions : pour le protocole BOSS donne une diminution de la consommation d'énergie et pour le protocole Geraf donne une légère diminution de consommation d'énergie.



### 5.4.3 Les paquets délivrés

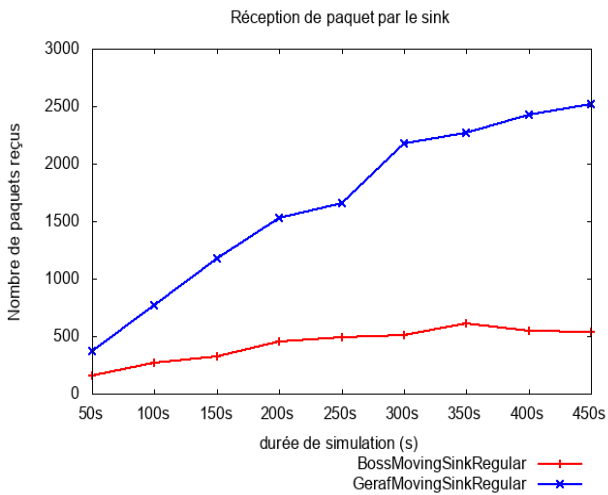


Figure 5.41 – Paquet délivré -Durée de simulation-Mouv. régulier sink

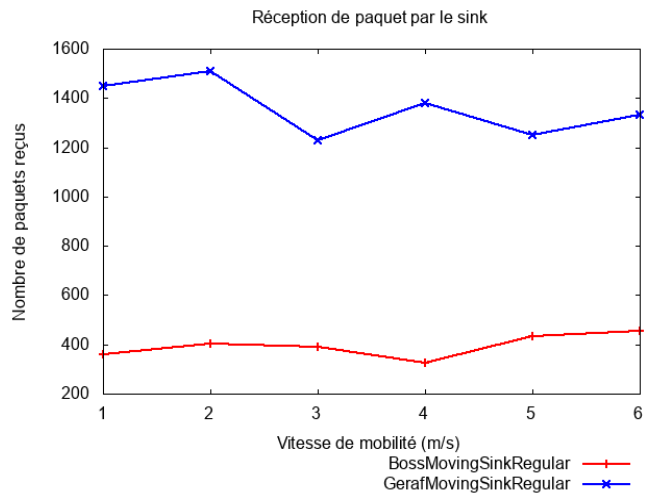


Figure 5.42 – Paquet délivré -Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

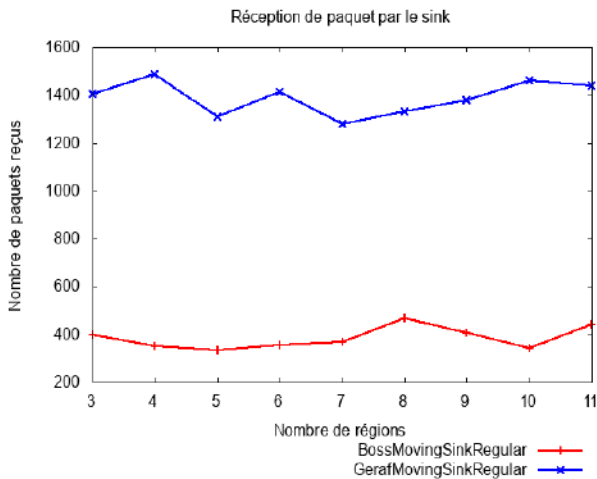


Figure 5.43– Paquet délivré -Nombre de régions-Mouv. régulier sink

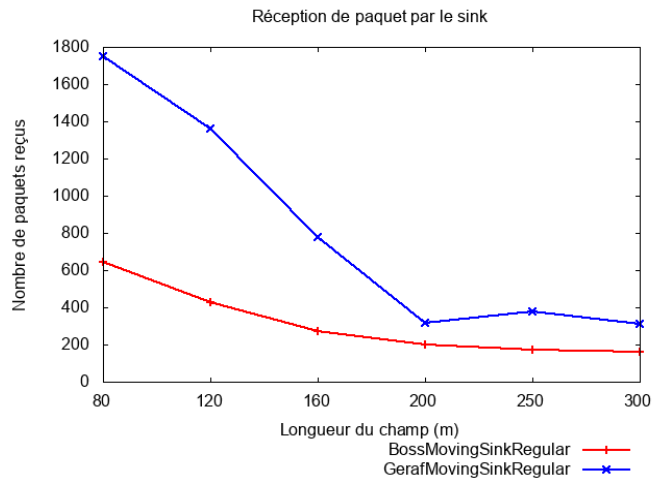


Figure 5.44 – Paquet délivré -Longueur de champ-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique paquet délivré, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats par rapports le protocole BOSS.

Pour les deux protocoles Geraf et BOSS :

- Les paquets délivrés ont diminué pour : une augmentation de la longueur du champ.
- Les paquets délivrés ont augmenté pour : une augmentation de la durée de simulation.
- Une augmentation de la vitesse de mobilité et du nombre de régions donne une légère différence de paquet délivré.

### 5.4.4 Délai moyen de bout en bout

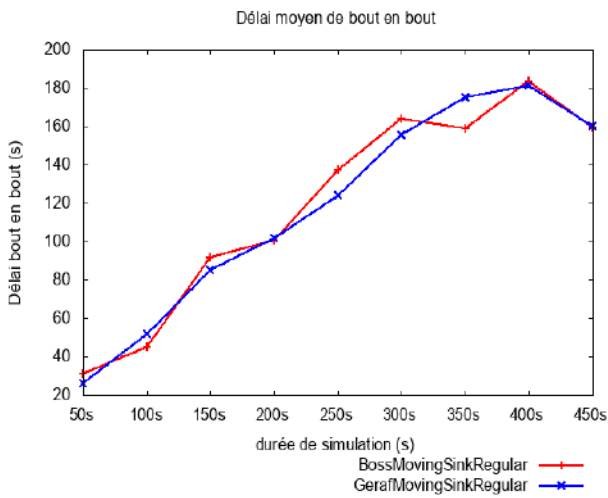


Figure 3.45 – Délai moyen-durée de simulation-Mouv. régulier sink

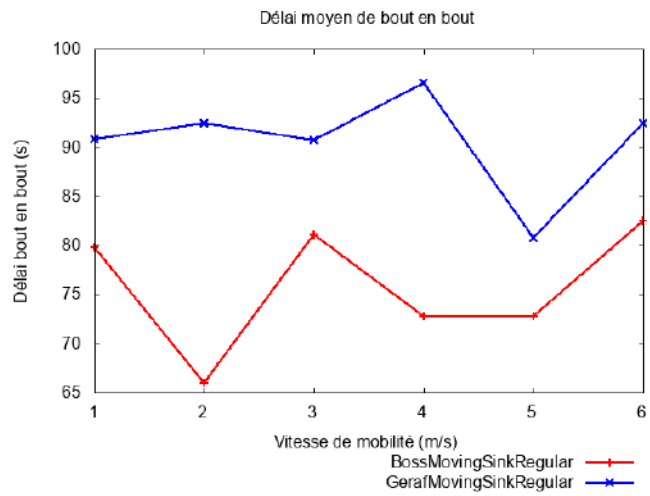


Figure 3.46 – Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

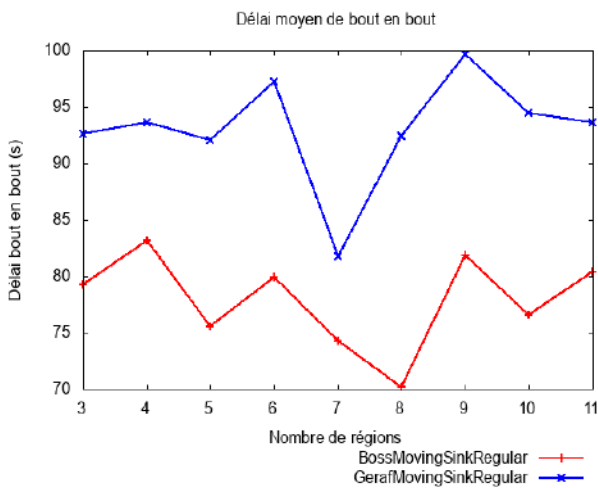


Figure 3.47 – Délai moyen-Nombre de région-Mouv. régulier sink

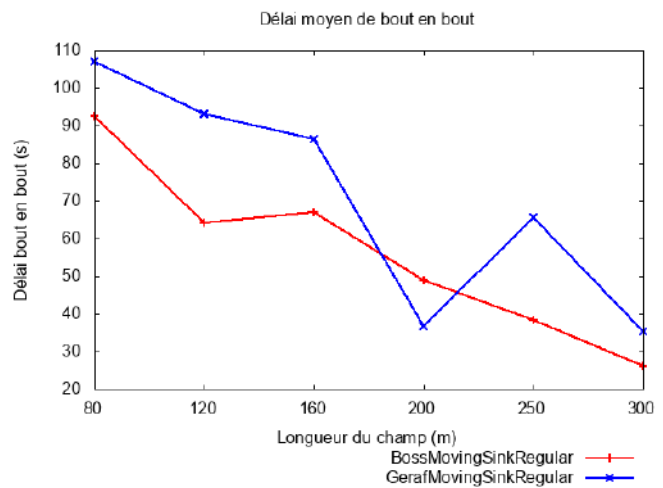


Figure 3.48 – Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique délai moyen, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats par rapports le protocole Geraf.

Une augmentation de la longueur du champ donne une diminution du délai moyen pour les deux protocoles. Le protocole BOSS donne des meilleurs résultats que le protocole Geraf.

Une augmentation de la durée de simulation donne une augmentation du délai moyen pour les deux protocoles. Il y a une ressemblance entre les deux.

Une augmentation du nombre de régions et de la vitesse de mobilité donne une légère différence du délai moyen pour les deux protocoles. Le protocole BOSS donne des meilleurs résultats que le protocole Geraf.

## **5.5 Conclusion**

Nous avons effectué des simulations approfondies en utilisant différentes conditions pour une comparaison avec un autre protocole de la même famille des protocoles de routage géographique, qui est le protocole Geraf. Cela nous a permis de conclure que le protocole Geraf est beaucoup plus efficace que le protocole BOSS dans l'énergie, les paquets dupliqués et les paquets délivrés. Pour le délai moyen, il y a une différence selon le mouvement du sink; dans le cas de sink fixe, il y a une très grande ressemblance entre les deux protocoles, dans le cas de sink en mouvement aléatoire, le protocole Geraf donne des meilleurs résultats que le protocole BOSS et dans le cas de sink en mouvement régulier, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats que le protocole Geraf.

## Conclusion générale

La durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil est rattachée directement à la durée de vie de la batterie de ces capteurs. Donc, on doit minimiser les tâches d'un capteur pour conserver l'énergie de sa batterie. Chaque capteur participe au routage de l'information à travers une architecture multi-sauts vers le sink. Le choix du prochain nœud (le relais), qui va transmettre l'information dépend du protocole de routage utilisé. Donc, le protocole de routage, qui permet de réduire la consommation d'énergie participe à l'amélioration de la durée de vie du réseau RCSF.

Les protocoles de routage géographique sont des protocoles qui utilisent la position géographique du nœud capteur pour prendre des décisions de routage et transmettre l'information vers la direction de la destination à un seul saut, dans le but de minimiser le nombre de sauts. Le routage géographique sans balise, une autre version qui élimine l'utilisation des balises Hello, qui permettent de connaître les voisins d'un nœud à un seul saut, dans le but d'économiser l'énergie de la batterie. Le routage géographique sans balise est devenu le plus important pour les RCSF, malgré que la technique GPS utilisé au niveau du capteur consomme beaucoup d'énergie.

De ce fait, on a choisi le protocole BOSS, qui est le plus célèbre dans la famille des protocoles de routage géographique sans balise. Pour faire une étude et d'analyser les performances à travers d'une comparaison avec un autre protocole de la même famille, qui est le protocole Geraf.

Le protocole BOSS est créé dans le but de réduire les collisions pendant la phase de la sélection du prochain saut à travers l'utilisation d'une nouvelle fonction d'affectation de délai d'attente dont la valeur dépend de la position du nœud.

Afin d'analyser les performances du BOSS, nous avons implémenté ce dernier à l'aide du simulateur Castalia basé sur OMNeT++. BOSS est un protocole inter-couche, son implémentation était entre la couche réseau et la couche MAC.

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'utilisation d'un sink en mouvement aléatoire donne des meilleurs résultats pour les paquets délivrés.
- L'utilisation d'un sink fixe garantit des bons résultats pour la consommation d'énergie, délai moyen et les paquets dupliqués.
- Lorsque le nombre de région augmenté implique la consommation d'énergie et les paquets dupliqués seront diminués.
- Lorsque le champ est étendu implique le délai moyen, les paquets dupliqués et les paquets délivrés seront diminués.

- Le protocole Geraf est beaucoup plus efficace que le protocole BOSS dans l'énergie, les paquets dupliqués et les paquets délivrés. Pour le délai moyen, il y a une différence selon le mouvement du sink ; le protocole BOSS est meilleur que le protocole Geraf dans le cas de mouvement régulier du sink, le protocole Geraf est meilleur que le protocole BOSS dans le cas de mouvement aléatoire du sink et il y a une très grande ressemblance entre les deux protocoles dans le cas de sink fixe.

Et comme perspective, ce travail peut être l'initiative d'un futur travail qui va étudier les performances de ce protocole avec deux sink.

Enfin, je tiens à signaler que ce travail m'a permis d'enrichir énormément mes connaissances dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, ce domaine intéressant, qui représente l'avenir de la recherche pour les réseaux sans fil.

## Bibliographie

- [1] Vargas, A. "OMNeT++ User Manual Version 4.3.1", OpenSim Ltd, 2011
- [2] Athanassios Boulis, "Castalia, A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks User's Manual", NICTA May 2013.
- [3] J. A. Sanchez, R. Marin-Perez, and P. M. Ruiz. "BOSS: Beacon-Less On-Demand Strategy for Geographic Routing in Wireless Sensor Networks". In Proceedings of 4th IEEE Int'l. Conf. Mobile Ad Hoc and Sensor Sys, pages 1–10, Oct. 2007
- [4] J. A. Sanchez, P. M. Ruiz, and R. Marin-Perez, "Beacon-less geographic routing made practical: Challenges, design guidelines, and protocols". IEEE Commun. Mag., 47(8):85–91, Aug. 2009
- [5] Indu, Sunita Dixit, " Wireless Sensor Networks: Issues & Challenges", IJCSMC, Vol. 3, Issue. 6, pg.681 – 685, June 2014,.
- [6] A. Khetrapal, "Routing techniques for Mobile Ad Hoc Networks Classification and Quantitative Analysis," Department of Computer Engineering, Delhi College of Engineering University, 2006
- [7] G. Acs and L. Buttyabv. "A taxonomy of routing protocols for wireless sensor networks," BUTE Telecommunication department, Jan. 2007.
- [8] Yacine KHALDI, "Performance analysis of a beaconless geo-routing protocol GeRaF in WSN", Université Kasdi Merbah Ouargla, Computer science, 2018
- [9] Ali BENZERBADJ, "Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance", Thèse de doctorat en Informatique, université d'Oran , 02/07/2018
- [10] S. Sharma, D. Kumar and R. Kumar, "QOS-Based Routing Protocol in WSN," Advances in Wireless and Mobile Communications. ISSN 0973-6972 Vol. 1, No. 1-3, pp.51-57, 2008.
- [11] Akkaya, Kemal, and Mohamed Younis. "A survey on routing protocols for wireless sensor networks." Ad hoc networks 3.3, 325-349, 2005
- [12] G. Acs and L. Buttyabv. "A taxonomy of routing protocols for wireless sensor networks," BUTE Telecommunication department, Jan. 2007
- [13] Intanagonwiwat, Chalermek, et al. "Directed diffusion for wireless sensor networking." IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN) 11.1, 2-16, 2003
- [14] Felemban, Emad, Chang-Gun Lee, and Eylem Ekici. "MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and. Timeliness in wireless sensor networks." IEEE transactions on mobile computing 5.6, 738-754, 2006
- [15] X. Hong, K. Xu and M. Gerla. "Scalable Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks," IEEE Network, University of California at Los Angeles, Aug. 2002
- [16] I.Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, "A survey on sensor networks," IEEE Communications Vol: 40 Issue: 8, pp.102-114, August 2002.

- [17] Jama N.Al-Karaki, A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks a survey," *Wireless Communications*, IEEE Publication Vol.11, Issue. Six, pp.6- 28, Dec. 2004.
- [18] M. Frikha, J.B. Slimane, "Conception and Simulation of Energy-Efficient AODV protocol Ad-Hoc Networks," *Tunisian Communication's*, Tunis, 2006
- [19] Daniel MABELE MONDONGA, "Etude sur les protocoles de routage d'un réseau sans fil en mode Ad Hoc et leurs impacts. "Cas de protocoles OLSR et AODV" ", Institut supérieur d'informatique, programmation et analyse de Kinshasa, 2010
- [20] Woodrow, Edward, and Wendi Heintzelman. "SPIN-IT: a data centric routing protocol for image retrieval in wireless networks." *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [21] Shah, Rahul C., and Jan M. Rabaey. "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks." *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2002.
- [22] Ye, Fan, et al. "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks." *Computer Communications and Networks, 2001. Proceedings. Tenth International Conference on*. IEEE, 2001.
- [23] Niculescu, Dragos, and Badri Nath. "Ad hoc positioning system (APS)." *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM'01. IEEE*. Vol. 5. IEEE, 2001.
- [24] Roychowdhury, Sinchan, and Chiranjib Patra. "Geographic adaptive fidelity and geographic energy aware routing in ad hoc routing." *International Conference*. Vol. 1. 2010.
- [25] Manjeshwar, Arati, and Dharma P. Agrawal. "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks." *IEEE*, 2001.
- [26] Rahman, Kazi Chandrima. "A survey on sensor network." *Journal of Computer and Information Technology* 1.1, 76-87, 2010
- [27] Aytaç Kaya, Ahmet Zengin and Hüseyin Ekiz, "Comparison of the Beacon-less Geographic Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", 978-1-4577-9538-2/11/\$26.00 ©2011 IEEE
- [28] Dallinge Laetitia, "Etude d'algorithmes de routage géographique utilisés dans les réseaux de capteur sans fils", Université de Genève, Computer Science, 4 Avril 2012
- [29] Ali BENZERBADJ, "Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance", Thèse de doctorat en Informatique, université d'Oran , 02/07/2018
- [30] Tahar Chaouch Amel, Benmoumene Abdellah Mahfoudh, "Analyse par simulation des performances d'un réseau de capteurs sans fil (WSN)", Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016
- [31] Eric BOSASI DOYI, "Gestion des ressources radios dans les réseaux sans fils : cas d'un reseau wimax", Université de Kinshasa, 2010
- [32] BERRABAH Abdelkrim, SAIDI Hassiba, "Balancement de charges dans les réseaux Ad Hoc ", Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen, Juillet 2013

- [33] TAHAR ABBES Mounir, "Proposition d'un protocole à économie d'énergie dans un réseau hybride GSM & AD HOC", université d'Oran, 2012
- [34] Sedrati Maamar, Aouragh Lamia, Guettala Leila, Bilami Azeddine, "Etude des Performances des Protocoles de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad-Hoc", Département d'informatique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université El Hadj Lakhdar – Batna, 2007
- [35] Yaser Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Université de Haute Alsace – Mulhouse, France, 2010
- [36] RAHMOUNE Amer, "Simulation d'un protocole de surveillance des interfaces d'un routeur", Université A/MIRA de Bejaïa, 2015
- [37] FARES Abdelfatah, "Développement d'une bibliothèque de capteurs ", université Montpellier 2, 25/04/2008
- [38] BENINE Safa, "le routage multi-chemin dans les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de master informatique, université Echahide Hamma Lakhdar El-oued, 2015
- [39] Diery NGOM, "Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité ", Thèse de Doctorat, l'Université de Haute Alsace (France) et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 17 Mai 2016
- [40] YACINE CHALLAL, "Réseaux de Capteurs Sans Fils", "[https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/RCSF\\_web.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/RCSF_web.html)", Version 1, 18/11/2008
- [41] Mehdi Bouallegue, "Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ", École doctorale, Université du Maine Tunis, 2016